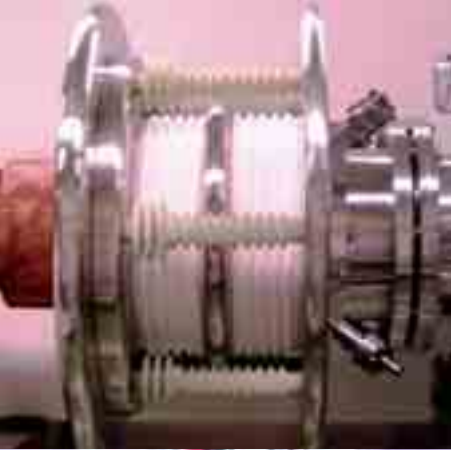
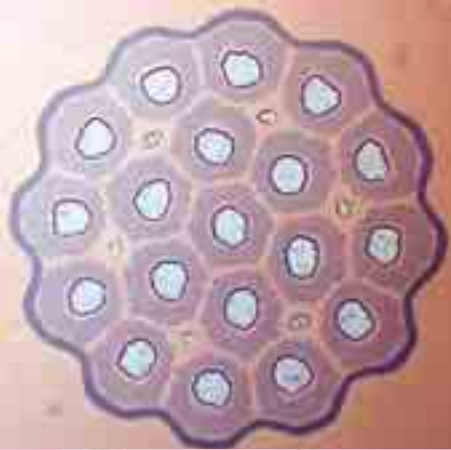
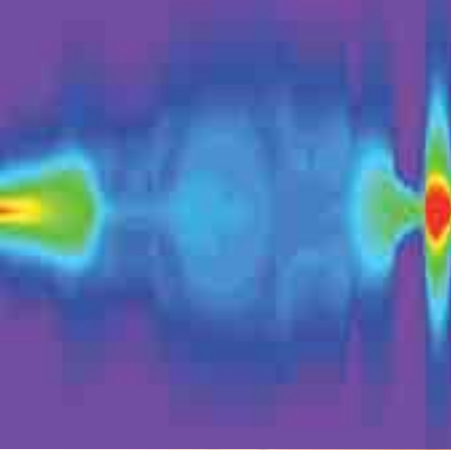


Direction des sciences de la matière

Institut de recherche sur les lois
fondamentales de l'Univers



Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

SACM 2010-2012

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



Préface	1
Les laboratoires	2
Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité	4
Le projet Spiral2	5
L'injecteur de protons à haute intensité lphi	8
La source européenne de spallation ESS	10
L'accélérateur prototype d'Ifmif	12
L'accélérateur linéaire à protons de Fair	15
Le quadripôle à radiofréquence du Linac4	16
Accélérateurs linéaires d'électrons et positons	17
Le collisionneur Clic	18
La source de lumière XFEL	19
Source de positons pour l'expérience GBar	21
Développements pour les accélérateurs de particules du futur	22
Étude et tests des sources d'ions	23
Simulation de la dynamique des faisceaux de particules	24
R&D sur les cavités supraconductrices à radiofréquence	26
Électroaimants supraconducteurs	29
Le spectromètre supraconducteur Glad pour R ³ B	30
L'imageur à haut champ magnétique Iseult pour la plateforme Neurospin	32
La bobine supraconductrice pour l'aimant hybride du LNCMI	35
Tests des aimants supraconducteurs de l'expérience Katrin	36
Cryogénie	37
Station d'essais des bobines toroïdales du tokamak JT-60SA	38
Les grands systèmes de refroidissement	39
Cibles d'hydrogène pour la physique nucléaire	40
Développements pour les aimants supraconducteurs du futur	41
R&D sur le refroidissement des aimants supraconducteurs	42
Développements pour les futurs aimants supraconducteurs du LHC	44
Utilisation des supraconducteurs à haute température critique	47
Utilisation du MgB ₂ pour des aimants supraconducteurs secs	48
Les plateformes d'expérimentation	49
Qualité, sécurité et environnement au SACM	54



Le service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

Le SACM fait partie de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (Irfu) de la Direction des sciences de la matière du CEA. Il est situé sur le centre de Saclay dans les locaux de l'ancien Laboratoire national Saturne, le LNS, et de l'ancien Service des techniques instrumentales de particules élémentaires, le Stipe. Ces locaux ont été rénovés et réunis dans une grande plateforme baptisée "le Synergium" qui occupe une superficie de 25 000 m². Le SACM qui accueille 75 ingénieurs-chercheurs et 45 techniciens a pour mission de mener à bien, avec la communauté nationale et internationale, des recherches et des développements d'excellence dans le domaine des accélérateurs de particules, des systèmes cryogéniques et des aimants supraconducteurs destinés à la recherche fondamentale. Depuis de nombreuses années, il joue un rôle majeur dans la construction des instruments de haute technologie nécessaires à ces recherches (LHC, W7-X, Spiral2, Fair, Iphi, ESS).

Son savoir-faire permet de valoriser ses connaissances dans des domaines connexes tels que l'énergie (étude de matériaux pour la fusion thermonucléaire via le projet Ifmif et qualification des bobines du tokamak japonais JT-60SA), les sciences du vivant (imageur par résonance magnétique à très haut champ Iseult pour Neurospin), et les sources de lumière (Soleil et Xfel).

Le SACM a aussi pour vocation d'assurer la conduite de projets de grande envergure et de développer les moyens d'essais correspondants. Ces projets se réalisent dans le cadre de la structure projet de l'Irfu en étroite association avec les autres services de l'Institut, tant de physique que de technologie, en particulier du Service d'ingénierie des systèmes, le SIS. Enfin, le transfert technologique à l'industrie est un élément naturel et primordial de ses nombreuses réalisations.

Le SACM regroupe un fort potentiel, à la fois de conception et de réalisation : théorie des accélérateurs, sources d'ions, cavités accélératrices conventionnelles et supraconductrices, aimants supraconducteurs, cryogénie associée. Il s'appuie sur des moyens d'essais conséquents, allant des petites stations d'essais pour caractériser les matériaux, à des stations de très grande taille capables de tester des ensembles complets (bobines et cavités supraconductrices). La vitalité du SACM repose aussi sur des équipes de R&D qui accueillent des jeunes doctorants et postdoctorants et lui permettent d'explorer de nouvelles technologies pour offrir les instruments nécessaires aux progrès de la recherche fondamentale et appliquée.

Le SACM regroupe cinq laboratoires :

- ▀ le Laboratoire d'études et de développement pour les accélérateurs,
- ▀ le Laboratoire d'ingénierie des structures accélératrices et des hyperfréquences,

- ▀ le Laboratoire d'intégration et de développement des cavités et des cryomodules,
- ▀ le Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs,
- ▀ le Laboratoire cryogénie et stations d'essais.

Un Conseil scientifique et technique de service, le CSTS, composé de 14 membres et de 7 experts internationaux extérieurs au CEA, se réunit une fois par an pour dresser un bilan des activités en cours et analyser les nouvelles propositions. Le CSTS aide le chef du SACM à élaborer la stratégie de recherche et de développement du service.

Au cours des trois dernières années d'importants jalons ont été franchis : les injecteurs Spiral2 et Ifmif ont été testés en situation opérationnelle dans les casemates du Synergium et ont atteint leurs performances nominales. Les 51 tonnes de supraconducteur nécessaires au projet Iseult ont été produites et les 170 doubles galettes ont été bobinées avec la précision requise. Le développement d'antennes innovantes pour l'imagerie médicale s'est poursuivi avec succès. Les sources du type Silhi très performantes vont maintenant être industrialisées et les logiciels de dynamique du faisceau sont commercialisés dans le monde entier. En octobre 2012, la station JT-60SA a reçu son imposant cryostat de test.

Dans les trois années qui viennent les efforts porteront sur la mise en service de l'injecteur Iphi, sur la phase industrielle de l'assemblage des cryomodules XFEL ainsi que sur la construction et le test de deux cryomodules innovants : le cryomodule pour l'accélérateur prototype Ifmif-Lipac et le démonstrateur technologique pour ESS. Le SACM contribuera aux avancées du projet Cilex vers de nouvelles techniques d'accélération et livrera l'injecteur de protons au projet Fair à Darmstadt. Dans le domaine du cryomagnétisme la station de test des bobines de JT-60SA sera mise en service en 2014 et ouvrira des prolongements technologiques vers le programme Iter. Le spectromètre R³B-Glad sera cryostaté et testé, l'aimant d'imagerie médicale Neurospin-Iseult sera cryostaté pour obtenir ses ambitieuses performances de champ magnétique, d'homogénéité et de stabilité. Le SACM participera de façon majeure aux développements de nouveaux aimants à champ élevé nécessaires à l'augmentation de luminosité et d'énergie du LHC.

D'ici 2017 et dans ses activités complémentaires d'accélérateurs et de cryomagnétisme le SACM va vivre des heures très riches à la hauteur des missions scientifiques majeures du CEA. De plus le SACM va participer résolument avec les communautés qui l'entourent au lancement et à la réussite du Campus de l'Université Paris-Saclay.

Antoine Daël, chef du SACM

LÉDA

Le **Laboratoire d'études et de développements pour les accélérateurs** (Léda) regroupe les compétences du SACM en conception, réalisation et tests de systèmes de production, de transport et d'accélération de faisceaux de particules chargées.

Constitué, au 31 décembre 2012, de 20 ingénieurs, 7 techniciens et 1 étudiant en thèse, le Léda comprend :

- ▀ une équipe d'experts en modélisation des faisceaux appliquée aux accélérateurs linéaires ou circulaires, en présence d'effets collectifs tels que la charge d'espace ou les champs de sillage, et en calculs électromagnétiques appliqués aux systèmes électrostatiques, magnétostatiques et radiofréquence ;
- ▀ une équipe technique maîtrisant les aspects d'installation, de montage mécanique et de refroidissement d'accélérateurs ;
- ▀ une équipe d'expérimentateurs spécialistes dans la mise en œuvre, le fonctionnement et l'optimisation de sources et d'injecteurs ;
- ▀ une équipe d'expérimentateurs experts dans la mesure des paramètres du faisceau impliquant la réalisation et la mise en œuvre de diagnostics innovants.

Pour préparer l'avenir, le Léda est engagé dans la construction d'un accélérateur pour la recherche en physique nucléaire (Fair), dans la conception du quadripôle à radiofréquence (RFQ) pour le projet ESS, dans l'exploration des bases théoriques et des techniques de la prochaine génération d'accélérateurs de particules (HiLumi LHC, Clic), et dans l'étude de l'accélération laser-plasma (projet Cilex).

Dès 2013, en plus du banc de test Betsi pour le développement de sources compactes d'ions légers et le test de diagnostics, le laboratoire pourra mettre à disposition de futurs utilisateurs des faisceaux intenses de protons de 3 MeV derrière le RFQ du projet Iphi.

LISAH

Le **Laboratoire d'ingénierie des systèmes accélérateurs et des hyperfréquences** (Lisah) compte, à la date du 31 décembre 2012, 13 ingénieurs et 5 techniciens. Leurs compétences et métiers gravitent entre la conception des structures électromagnétiques à haute fréquence et leur mise en œuvre avec une instrumentation appropriée.

Les activités du laboratoire concernent principalement le développement des systèmes pour les accélérateurs de particules utilisés en physique (quadripôle à radiofréquence, cryomodule avec cavité supraconductrice et coupleur de puissance), ainsi que leurs outils de qualification (source de puissance, plateforme de test et leurs instrumentations associées). Toutefois, elles peuvent également s'étendre à d'autres domaines d'application comme les antennes pour l'imagerie médicale par résonance magnétique à haut champ.

Dans ses missions, le Lisah s'appuie notamment sur des expertises internes à l'Irfu en sciences des matériaux, génie des procédés, construction mécanique et assurance qualité. Il met ses compétences au service des projets de l'Irfu, soit en prenant en charge la responsabilité d'un lot complet, soit en fournissant une expertise technique.

LIDC2

Le **Laboratoire d'intégration et de développement des cavités et des cryomodules** (LiDC2) regroupe les compétences du SACM concernant la recherche sur les cavités accélératrices supraconductrices et l'intégration des cryomodules.

Le LiDC2 met ses compétences au service des projets de l'Irfu. Il conduit la R&D nécessaire au développement des cavités tant d'un point de vue des matériaux (multicouches, polissage) que des surfaces (électropolissage vertical et rinçage à haute pression). Il participe à la conception et au développement des cryomodules pour des accélérateurs nationaux (Spiral2) ou internationaux (XFel, ESS, etc). Il prend en charge leur intégration dès le prototypage. Il assure aussi la gestion des moyens communs du SACM qui lui sont rattachés tels que les salles blanches, l'installation de traitement chimique, les laboratoires de caractérisation des matériaux et les halls de montage.

Les 11 ingénieurs et 7 techniciens contribuent au fonctionnement du laboratoire et aux avancées des projets qui lui sont confiés.

LÉAS

Chargé de répondre aux besoins des physiciens de l'Irfu dans le domaine des champs magnétiques, le **Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs** (Léas) est constitué, fin 2012, de 8 techniciens, 17 ingénieurs et 1 étudiant en thèse. Les équipes du laboratoire assurent la conception et la maîtrise d'œuvre d'aimants supraconducteurs intégrés à des dispositifs expérimentaux, et notamment des aimants de grande taille ou à champ magnétique élevé.

Dans le cadre de la conception des aimants supraconducteurs, le Léas exerce ses compétences dans les domaines de l'optimisation de la géométrie des bobines, de la conception du conducteur, des calculs mécaniques, électromagnétiques et thermiques, et de leur protection en cas de retour des aimants à l'état résistif. Outre la conception des aimants, le Léas est aussi en mesure d'assurer le management de grands projets, de prendre en charge la réalisation des aimants et leur intégration dans leur cryostat et d'assurer le suivi des réalisations industrielles. Le contrôle des aimants est assuré en collaboration avec le Laboratoire cryogénie et station d'essais (LCSE). Les mesures nécessaires couvrent les analyses des essais à température ambiante et cryogénique avec, entre autres, les analyses de *quench* et les mesures magnétiques.

D'une part, des actions de R&D sont menées dans le cadre des projets de réalisation tels que le dipôle Glad du spectromètre pour R³B ou le solénoïde de l'imageur Iseult en fonction de leurs besoins. D'autre part, en vue des futures évolutions du LHC d'importants développements portant sur l'utilisation du niobium étain (Nb₃Sn) et des supraconducteurs à haute température critique sont entrepris. L'utilisation de conducteurs en diborure de magnésium (MgB₂) fait également l'objet de développements.

LCSE

La mission du **Laboratoire cryogénie et stations d'essais** (LCSE) est axée sur la maîtrise de la cryogénie dans les domaines des aimants supraconducteurs, des cavités accélératrices, des détecteurs pour la physique (cibles cryogéniques, calorimètres) et de la production et distribution d'hélium liquide. Cette maîtrise s'exerce dans la capacité à concevoir, construire et faire fonctionner des installations cryogéniques de taille et de nature très variées. Les fluides couramment utilisés sont l'hélium, l'azote, l'argon ou l'hydrogène. Les études et réalisations portent sur les cryostats et la cryodistribution associée, ainsi que sur la mise en œuvre des moyens de réfrigération à basse température allant du cryogénérateur au réfrigérateur à hélium de forte puissance.

Le laboratoire gère plusieurs stations d'essais et de caractérisations offrant un ensemble de 16 équipements complémentaires dans l'étude des propriétés mécaniques, thermiques et électriques de matériaux (isolants, composites, alliages métalliques et supraconducteurs) aux températures cryogéniques et sous champ magnétique, et le test, dans les conditions nominales, des sous-ensembles cryogéniques (aimants, cavités, cibles...) sur des tailles allant de quelques millimètres pour des échantillons à plusieurs mètres pour des équipements assemblés.

Des actions de R&D sont menées sur les transferts thermiques à basse température (hélium II en milieu poreux, conductibilité thermique), sur les écoulements diphasiques (modes établis et transitoires de boucles thermosiphon en hélium I, en azote...) et sur le développement de l'instrumentation.

L'effectif du laboratoire est, au 31 décembre 2012, de 13 ingénieurs, 13 techniciens et un étudiant en thèse.



Accélérateurs linéaires d'ions
à haute intensité

Le projet Spiral2

Suite à la phase d'avant-projet détaillé, pour laquelle le SACM a eu un rôle moteur, le projet Spiral2 est en phase de réalisation et de consolidation. L'Irfu a la responsabilité de la construction et de l'installation de l'injecteur d'ions légers à Saclay, dans le but de faciliter l'installation finale des lignes au Ganil (Grand accélérateur national d'ions lourds installé à Caen), de la conception et du suivi de réalisation du quadripôle à radiofréquence, du développement, de la réalisation, des tests et de la livraison au Ganil des 12 cryomodules à bas béta, et du développement du spectromètre S³.

L'injecteur d'ions légers

L'effort du SACM se poursuit à travers une expertise orientée sur trois axes de travail majeurs : la dynamique des faisceaux, les procédures de réglage et le contrôle-commande associé, et les expériences avec des faisceaux. Ainsi, l'injecteur de protons et de deutons comprenant la source et les lignes de faisceau de basse énergie a été complètement installé et testé à Saclay. L'injecteur d'ions légers a fourni jusqu'à 5 mA de protons et de deutons, en mode continu ou pulsé. Ces faisceaux seront reproduits et injectés dans le quadripôle à radiofréquence (RFQ) de Spiral2 à Caen.

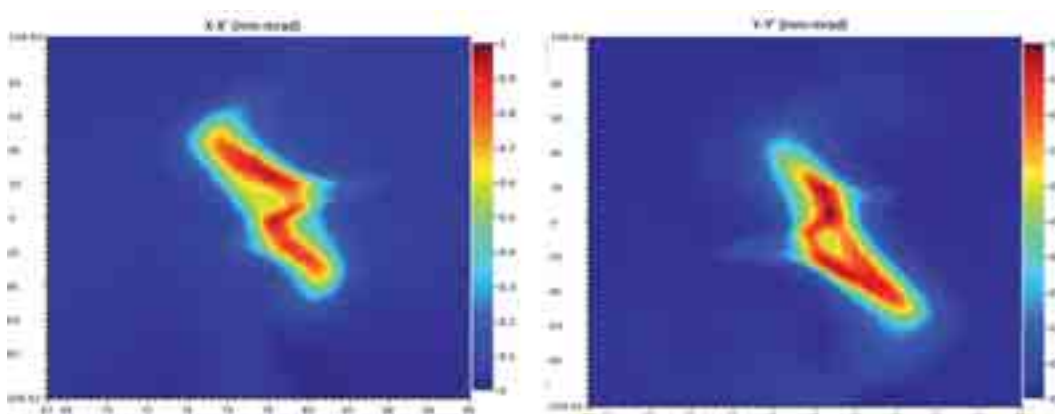
La construction de l'injecteur a été réalisée par étapes successives, étalées sur deux ans, de sorte que soient mesurées les caractéristiques du faisceau à différentes positions de la ligne. Ce travail s'est achevé fin juillet 2012 par des diagnostics à la position exacte qu'occupera le RFQ dans l'injecteur. Les valeurs obtenues ont ensuite été introduites dans un modèle de simulation pour estimer les caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ. C'est sans doute la première fois qu'un faisceau de haute intensité est mesuré au point exact d'injection d'un RFQ, puis transporté dans celui-ci par simulation. Les résultats ainsi obtenus ont validé la conception et la campagne de tests de l'injecteur de Spiral2 réalisées à l'Irfu.

Aujourd'hui, l'injecteur est en cours de remontage dans le bâtiment de l'accélérateur Spiral2 au Ganil. Les



L'injecteur d'ions légers Spiral2 dans sa casemate au SACM.

prochaines étapes seront le redémarrage de l'installation et finalement l'injection du faisceau dans la cavité RFQ. Les caractéristiques du faisceau à la sortie de cette cavité seront mesurées et comparées avec les résultats prédits par la simulation.



Émittances du faisceau de deutons de 5 mA mesurées à l'Irfu à la position exacte qu'occupera le RFQ dans l'injecteur au Ganil, validant les performances de l'injecteur de Spiral2.

Le quadripôle à radiofréquence

Le quadripôle à radiofréquence est une structure incontournable pour les accélérateurs linéaires d'ions. Il permet la mise en paquets du faisceau et une pré-accelération indispensables à un transfert d'énergie efficace dans les étages supérieurs tout en assurant le confinement axial des particules. L'optimisation des RFQ vise à assurer le groupement le plus efficace possible pour une consommation électrique minimale et une bonne tenue au claquage. Reproduire à quelques pour cent près l'amplitude optimisée du champ électromagnétique requiert des tolérances de fabrication de l'ordre de quelques dizaines de microns au niveau de l'extrémité des pôles du RFQ.



Premier tronçon du RFQ.

Le RFQ de Spiral2 fonctionnera à 88,05 MHz et comportera un seul segment de 5 m de longueur. Cette cavité devra accélérer les faisceaux avec un rendement supérieur à 97 % pour des intensités atteignant 5 mA de deutons avec une énergie de 40 MeV par nucléon, en régime continu. Chaque tronçon d'un mètre est formé de quatre pôles en cuivre assemblés dans un tube cylindrique. Il a été conçu par les équipes du SACM et du SIS qui assurent également le suivi de la réalisation. Il est construit avec une précision géométrique de $\pm 50 \mu\text{m}$ par tronçon et de $\pm 100 \mu\text{m}$ pour deux tronçons consécutifs. Les incompressibles défauts géométriques de fabrication seront compensés par l'enfoncement jusqu'à 123 mm de 40 pistons, pour obtenir l'accord en fréquence et la loi de tension requise par la dynamique du faisceau. Les tronçons du RFQ sont en cours de réalisation chez *Research Instruments GmbH* près de Cologne en Allemagne et doivent être réceptionnés au cours de l'année 2013.

Les cryomodules à bas béta

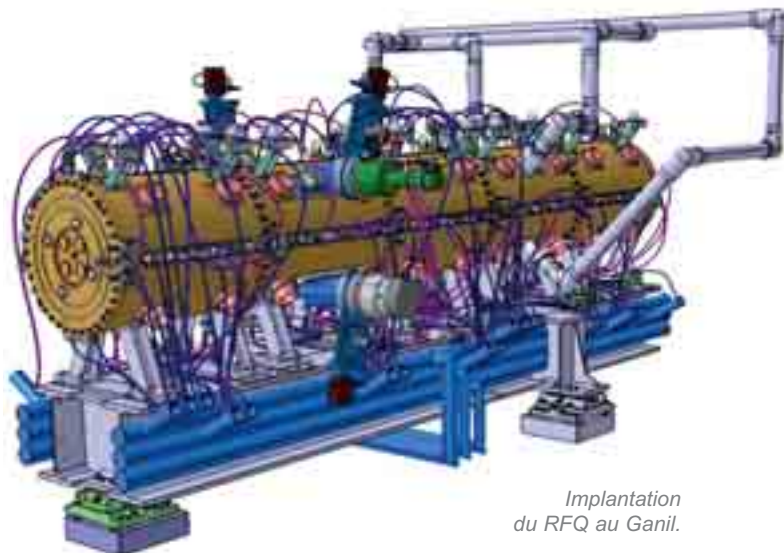
L'accélérateur linéaire supraconducteur de Spiral2 comportera 2 familles de cryomodules contenant des cavités dont les géométries sont optimisées pour accélérer des particules à 7 % de la vitesse de la lumière (cavités à bas béta : $\beta = 0,07$) et à 12 % de la vitesse de la lumière (cavités à haut béta : $\beta = 0,12$).



Montage du coupleur de puissance sur la cavité de Spiral2 en salle blanche.

Chaque cryomodule à bas béta contient une seule cavité en niobium massif qui est équipée d'un coupleur de puissance permettant d'injecter une puissance radiofréquence (RF) maximale de 10 kW en continu. Ces coupleurs sont fournis par le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC) de Grenoble. Des circuits cryogéniques associés à un écran thermique et des multicouches de superisolation permettent de refroidir la cavité à 4 K pour lui conférer ses propriétés supraconductrices. Un système mécanique permet d'ajuster la fréquence de la cavité par déformation de ses parois avec une résolution extrême (quelques nanomètres) sur une grande amplitude (2 millimètres).

Avant de lancer la fabrication des cryomodules de série, un cryomodule de qualification a été réalisé. Les premiers tests à 4 K effectués en décembre 2008 ont permis d'atteindre la puissance RF maximale de 10 kW. Les commandes des cavités et des cryostats de série ont été passées au cours de l'année 2009 et la livraison de l'ensemble des composants, cavités et cryomodules, a eu lieu en 2010. Le premier cryomodule assemblé a été testé en 2011 et a présenté une très forte consommation cryogénique due à une émission électronique intense lorsque la cavité était en fonctionnement. Ce phénomène était provoqué par une pollution dont la cause a été identifiée au niveau du coupleur de puissance. Le LPSC a pu effectuer les modifications



Implantation du RFQ au Ganil.

nécessaires des installations et des procédures de préparation pour livrer de nouveaux coupleurs avec les critères de propreté appropriés. Pendant cette période un cryomodule a été assemblé au SACM sans coupleur de puissance, mais avec une antenne fonctionnant au couplage critique. Les tests de ce cryomodule ont permis de qualifier tous les composants et les fonctionnements du cryomodule sous la responsabilité du SACM.



Cryomodules en cours d'assemblage après leur sortie de la salle blanche.

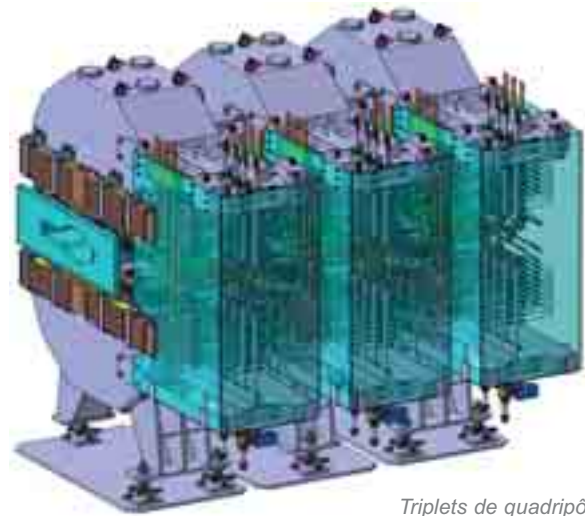
À la fin de l'année 2012, trois cryomodules assemblés avec de nouveaux coupleurs de puissance ont subi avec succès les tests de qualification pour leur installation sur l'accélérateur Spiral2. Un quatrième cryomodule a été assemblé et les tests de qualification en puissance RF commenceront en janvier 2013. L'assemblage d'un cinquième cryomodule et sera finalisé au début de l'année 2013.

Le spectromètre S^3

Le spectromètre S^3 (*Super separator spectrometer*) va utiliser les faisceaux très intenses d'ions lourds stables produits par Spiral2 au Ganil pour étudier la synthèse et la spectroscopie de noyaux rares, comme les noyaux superlourds et les noyaux très déficients en neutrons. S^3 doit combiner une grande transmission et une excellente sélectivité. En effet, les noyaux d'intérêt ont de très larges distributions en angle, en moment et en états de charge. Ils sont aussi masqués par une majorité de noyaux parasites.

Implantation du spectromètre dans l'aire expérimentale S^3 .

En bas à droite : plan de focalisation finale.



Triplets de quadripôles ouverts conventionnels.

L'optique du spectromètre est réalisée avec des triplets de quadripôles supraconducteurs. Les simulations réalisées par le SACM, en collaboration avec le Ganil et ANL (*Argonne National Laboratory*), montrent que la correction des aberrations est possible avec des hexapôles et des octupôles superposés aux quadripôles. Le spectromètre est organisé en deux étages de séparation. Le premier étage est un achromate en moment, qui utilise deux dipôles magnétiques. Il sert à rejeter la plupart des noyaux parasites, principalement le faisceau primaire. Le SACM a étudié les multipôles ouverts, de technologie conventionnelle, permettant l'évacuation et l'arrêt du faisceau primaire. Le SIS travaille sur les blocs d'arrêt soumis à des dépôts élevés de puissance. Le deuxième étage est un séparateur de masse, combinant un dipôle électrique et un dipôle magnétique, pour l'identification des noyaux. La mise en service de S^3 est prévue en 2014 avec les premiers faisceaux de Spiral2.



L'injecteur de protons de haute intensité Iphi

Un accélérateur de protons de haute intensité permet de réaliser des sources intenses de faisceaux secondaires : neutrons, muons, neutrinos, noyaux radioactifs, etc., dont les caractéristiques ouvrent de nouveaux champs d'études et d'applications, en recherche fondamentale, comme en recherche appliquée. La construction et le test d'un prototype de ces accélérateurs de future génération, en particulier de la partie à basse énergie, permettra de disposer de références conceptuelles et expérimentales pour les choix techniques futurs. La construction du prototype d'injecteur de protons de haute intensité, Iphi, répond à ces objectifs. Le projet Iphi est réalisé en collaboration entre la Direction des sciences de la matière (DSM) du CEA, l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS et le Cern.

Iphi est un prototype d'injecteur de protons accélérant jusqu'à 3 MeV un faisceau d'un courant continu de 100 mA. Il se compose principalement d'une source de protons nommée Silhi (Source d'ions légers à haute intensité) et de son transport de faisceau à basse énergie (95 keV), d'une cavité accélératrice de type RFQ (*radio frequency quadrupole*) portant l'énergie à 3 MeV et d'une ligne de diagnostics destinée à mesurer avec la plus grande précision possible toutes les caractéristiques essentielles du faisceau en sortie du RFQ.

La source Silhi

La source Silhi fonctionne depuis 1997 avec une très haute disponibilité. Elle sert de banc de test pour les démonstrations de période de fonctionnement de longue durée en produisant continuellement un faisceau de protons de 100 mA à 95 keV. Lors de ces périodes de fonctionnement, le faisceau de protons est utilisé pour tester de nouveaux diagnostics non interceptifs (profileur à ionisation de gaz résiduel, mesureur de profil transverse par tomographie) de faisceaux intenses.



Mesureur de profil par tomographie sur la ligne de transport de Silhi.

Fabrication de la cavité accélératrice de type RFQ

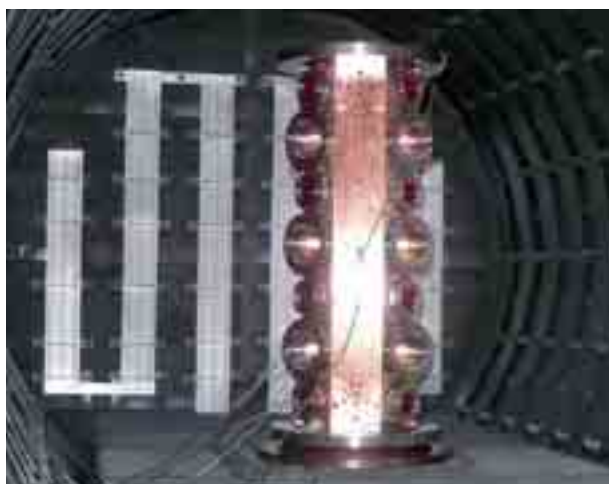


Dispositif de mesures en radiofréquence sur un tronçon d'Iphi.

La cavité accélératrice RFQ constitue le cœur de cet accélérateur. En effet, une telle cavité résonante excitée par une onde de radiofréquence de 352 MHz, est capable en même temps de regrouper quasiment sans pertes le faisceau continu issu de la source et de l'accélérer tout en le focalisant. La contrepartie de ces exceptionnelles qualités est une très grande difficulté technologique de réalisation.

La cavité est constituée de six éléments – les tronçons – d'environ un mètre chacun. Chaque tronçon individuel est usiné en quatre parties appelées pôles. Le profil modulé de ces pôles doit être réalisé avec une précision de ± 20 micromètres. Des canaux de refroidissement sont percés longitudinalement sur un mètre avec une précision de positionnement de ± 200 micromètres. Le contrôle de ces précisions se fait par des mesures en radiofréquence (RF) d'un tronçon assemblé lors des différentes

étapes de fabrication. Le matériau choisi est un cuivre ultra pur exempt d'oxygène, forgé à chaud dans les trois directions puis stabilisé par un cycle thermique. Après la phase d'ébauchage (cote + 1 mm), chaque pôle subit un nouveau cycle thermique sous vide à



Vue d'un tronçon d'Iphi dans le four juste avant le brasage en position verticale.

800 °C destiné à relâcher les contraintes mécaniques engendrées par l'outil de fraisage. À l'issue de l'usinage de finition, les quatre pôles ainsi que l'ensemble des appendices nécessaires au fonctionnement (brides, piquages de pompage et piquages des pistons d'accord) sont assemblés par un brasage vertical à 800 °C dans un four sous vide. La fabrication des tronçons de série a débuté en 2004. Au cours du projet, les évolutions technologiques ont obligé le CEA à définir une nouvelle méthodologie de fabrication. Cette nouvelle approche technologique a conduit à mettre en place un partenariat de l'équipe d'Iphi avec deux industriels tout en définissant la part de chacun : usinage pour Mécachrome, nettoyage par l'équipe d'Iphi et brasage par Bodycote. La définition mécanique se fait en accord avec les partenaires. À l'été 2010, le CEA était en possession de trois tronçons finis. Les trois derniers ont été livrés à la fin 2012. La géométrie des tronçons est validée par des mesures tridimensionnelles, la qualité du champ accélérateur est quantifiée par les mesures RF et l'étanchéité au vide est vérifiée par des tests de fuite très poussés.



Début du montage du système de pompage sur le RFQ.

Installation à Saclay

L'installation d'Iphi à Saclay dans les halls libérés de l'accélérateur Saturne a débuté en 2003 par l'assemblage de la source de protons et des protections biologiques. Le système de refroidissement et les générateurs de puissance RF (klystrons provenant du Cern) ont été validés. Les infrastructures de sécurité (accès et détection de rayonnement) sont opérationnelles. La ligne de diagnostics pour caractériser le faisceau est montée et mise sous vide. Tous les aspects du contrôle-commande sont validés. Les fenêtres de transmission de la puissance RF ont été conditionnées en 2011. Au cours de l'année 2012, l'assemblage des tronçons sur poutre a commencé avec les réglages RF de la cavité RFQ complète avec les 6 tronçons et les premiers montages du système de pompage.



Vue du RFQ complet (6 tronçons) d'Iphi sur la poutre avant les réglages en radiofréquence.

Les essais d'Iphi se dérouleront en trois phases sur environ deux années :

- ▶ une période de démarrage et de montée en puissance jusqu'à atteindre les performances nominales pour les essais correspondant à un fonctionnement de démonstration avec les caractéristiques de faisceau du programme européen ESS (*European spallation source*) ;
- ▶ une deuxième phase correspondant à un fonctionnement de démonstration avec les caractéristiques de faisceau du programme Eurotrans : essais de fiabilité à intensité réduite ;
- ▶ la troisième période consistera à monter en puissance pour atteindre les caractéristiques nominales du démonstrateur Iphi.

La source européenne de spallation ESS

L'ESS (*European spallation source*) sera la source de spallation la plus puissante au monde (5 MW) et produira les premiers neutrons à l'horizon 2020 à Lund en Suède. La source de neutrons se compose de trois principaux sous-ensembles : l'accélérateur linéaire, la cible et une suite d'instruments prenant place autour de la cible. L'accélérateur linéaire comprend dans sa section à basse énergie ($E \leq 80$ MeV) un quadripôle à radiofréquence (RFQ : *radiofrequency quadrupole*) et un accélérateur à tubes de glissement (DTL : *drift tube linac*) ; sa section à haute énergie est composée de cavités supraconductrices permettant d'accélérer les protons jusqu'à 2,5 GeV. Il y a trois familles de cavités supraconductrices : une première famille de cavités de type spoke à 352 MHz optimisée pour des faisceaux de protons à 50 % de la vitesse de la lumière ($\beta = 0,50$) pour les énergies comprises entre 80 MeV et 200 MeV, et ensuite deux familles de cavités elliptiques à 704 MHz ; les premières à $\beta = 0,67$, pour les énergies comprises entre 200 MeV et 650 MeV, et les secondes à $\beta = 0,86$, pour les énergies comprises entre 650 MeV et 2,5 GeV.

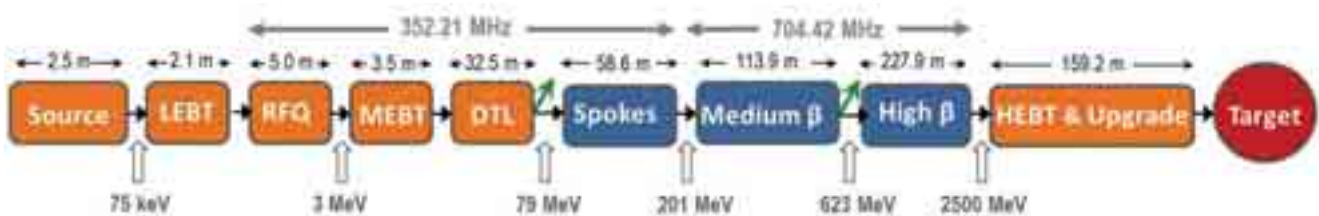


Schéma de l'accélérateur ESS. Les sections comprenant des cavités supraconductrices sont représentées en bleu.

L'accord franco-suédois couvre la phase de conception de l'accélérateur ADU (*accelerator design update*) pendant les années 2010 à 2012, et prépare la phase de réalisation qui débute en janvier 2013. Cet accord se décline en huit projets dont cinq sous la responsabilité de l'Irfu, deux sous celle de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO) et un en collaboration entre les deux organismes :

- Projet 1 : test de fiabilité de l'injecteur
- Projet 2 : installation d'un bunker de conditionnement des coupleurs à 352 MHz
- Projet 3 : 8 cavités elliptiques supraconductrices équipées et testées
- Projet 4 : contribution au *technical design report* (design du RFQ)
- Projet 5 : contribution aux études mécaniques
- Projet 6 : cryomodule spoke (IPNO)
- Projet 7 : installation de nouvelles infrastructures pour les cavités supraconductrices (IPNO)
- Projet 8 : conception, réalisation et test d'un cryomodule prototype à cavités elliptiques (collaboration Irfu-IPNO)

Test de fiabilité de l'injecteur

Les tests de fiabilité de l'injecteur seront effectués sur la plateforme Iphi avec la structure temporelle du faisceau d'ESS. Le projet ESS a contribué à renforcer l'activité de finalisation de l'injecteur Iphi, en particulier du RFQ, afin que les tests puissent commencer dans les meilleurs délais en 2013, avec un faisceau fiable, dont la structure sera celle d'ESS.

Installation d'un bunker de conditionnement des coupleurs de puissance à 352 MHz

Le bunker de conditionnement des coupleurs de puissance à 352 MHz, nommé bunker Ifmif-ESS, a été installé dans le bâtiment 126 du CEA Saclay. Une ligne de guides d'ondes le relie aux klystrons d'Iphi. Ce bunker permettra l'installation courant 2013 par l'IPNO du banc de conditionnement des coupleurs à 352 MHz pour les cavités spokes dont l'IPNO a la charge. La taille de ce bunker permet les tests de cryomodules de grande taille, comme le cryomodule prototype d'ESS, ou le cryomodule d'Ifmif.



Coupe de la cavité elliptique ESS.

Cavités elliptiques supraconductrices équipées

L'étude des cavités elliptiques à $\beta = 0,86$ a été finalisée et deux cavités prototypes ont été commandées à deux fabricants différents. Leur livraison est prévue en juin 2013. Ces cavités seront équipées d'un coupleur de



Cavité ESS munie de son coupleur de puissance et de son système d'accord en fréquence.

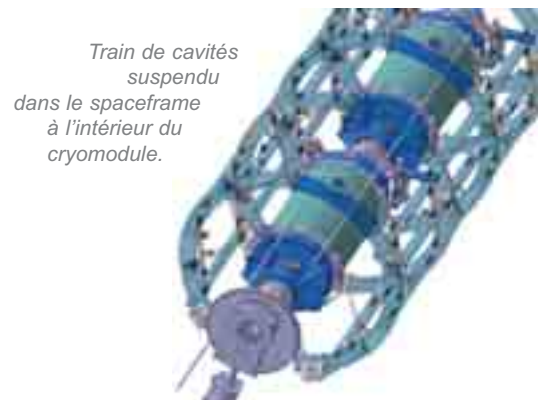
puissance et d'un système d'accord piézoélectrique déjà développé et testé au SACM avec succès dans le cadre du projet européen Hipp (High-intensity pulsed proton injectors). Les études de conception du blindage magnétique sont finalisées. Ce composant est le 3^e équipement des cavités elliptiques fourni dans le cadre du projet 3. Les études de détail des blindages, des coupleurs et des systèmes d'accord seront finalisées au début de l'année 2013 avant le lancement en fabrication des composants.

Conception du quadripôle à radiofréquence

Le design du RFQ a été effectué sur la base de spécifications qui ont évolué au cours de l'été 2012 à la demande d'ESS. Les études en cours ont donc été stoppées en l'état à ce moment-là. Seules restaient à faire les études thermomécaniques pour finaliser le dossier. Les nouvelles spécifications ont été reçues en décembre 2012, permettant de commencer la conception d'un nouveau RFQ de 4 m de long au lieu de 5 m pour le RFQ initial.

Cryomodule prototype à cavités elliptiques

Le projet 8 a fait l'objet d'un avenant à l'accord initial franco-suédois, et le travail a commencé en avril 2012. Il concerne l'étude, la réalisation, l'assemblage et les



Train de cavités suspendu dans le spaceframe à l'intérieur du cryomodule.

tests en puissance radiofréquence d'un cryomodule prototype ECCTD (Elliptical cavity cryomodule technology demonstrator). L'ECCTD contient quatre cavités supraconductrices elliptiques à $f = 700$ MHz et $\beta = 0,86$. Les études mécaniques du cryomodule sont effectuées par l'IPNO. Les cavités, les coupleurs de puissance, les systèmes d'accord et les blindages magnétiques seront livrés, testés et qualifiés dans le cadre du projet 3 par le SACM ; les autres composants du cryomodule seront livrés par l'IPNO. L'assemblage sera effectué à l'Irfu, dans la nouvelle salle blanche qui sera construite au cours du premier semestre 2013. Il sera ensuite testé dans le bunker Ifmif-ESS.

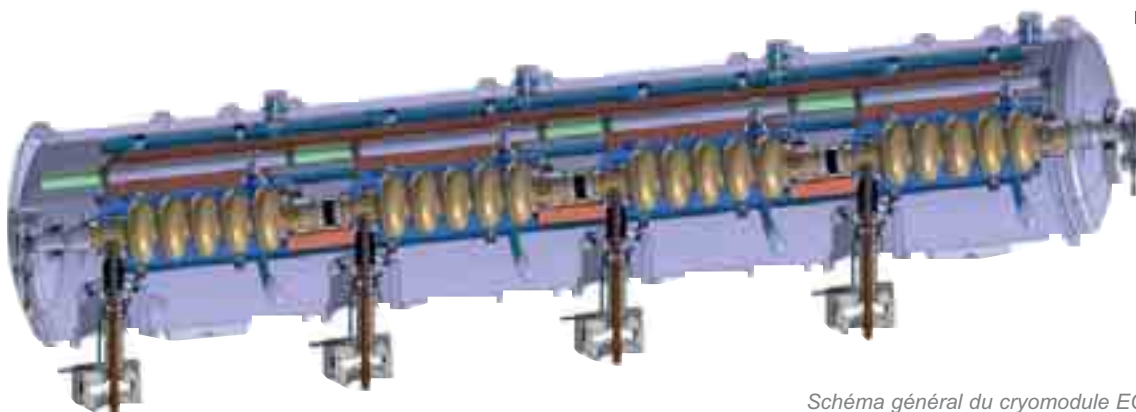


Schéma général du cryomodule ECCTD.

L'accélérateur prototype d'Ifmif

Dans le cadre de l'approche élargie d'Iter, l'Irfu est chargé de mettre en œuvre la contribution française au projet Ifmif (*International fusion material irradiation facility*) qui permettra de tester les matériaux développés pour les futures installations de fusion nucléaire. Une première phase, appelée Eveda (*Engineering validation and engineering design activity*) consiste en la construction à l'échelle 1 de la partie à basse énergie (jusqu'à 9 MeV) et en sa caractérisation ; elle permettra de valider la conception d'une telle machine.

Record mondial pour l'injecteur de deutons

Le premier élément de l'accélérateur Ifmif-Eveda, l'injecteur, a été conçu et réalisé par des équipes du SACM en collaboration avec le SIS. Il a été implanté dans le hall du bâtiment 126 du CEA Saclay au début de l'année 2011. Cet injecteur est constitué d'une source d'ions à résonance cyclotronique électronique (ECR) placée sur une plateforme à haute tension pouvant atteindre 100 kV et d'une ligne de transport (référencée à la masse) équipée de solénoïdes, de groupes de pompage et de diagnostics. Ces équipements ont été implantés à l'intérieur d'une casemate en béton, un des éléments importants du système de radioprotection.



Caractérisation du faisceau en cours.

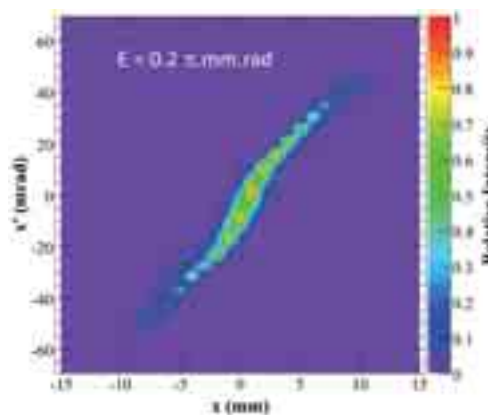


Photo P.Stroppa/CEA

Injecteur d'Ifmif avec de gauche à droite : la source, le tube accélérateur et la ligne de transport à basse énergie.

Après réception des différents équipements et conditionnement de l'injecteur, un faisceau d'ions hydrogène a été produit et guidé dans la ligne de transport à des énergies de 50 à 100 keV en mode pulsé et en mode continu. Récemment, le premier faisceau de deutons a été extrait à une énergie de 100 keV avec un cycle utile de 1 % (10 ms – 1 Hz). Le cycle utile a été progressivement porté à 10 % puis 30 % et 50 % avant de passer à un fonctionnement continu. Lors de ces étapes le faisceau a été mesuré et analysé à l'aide de diagnostics spécialement développés pour cette application.

En novembre 2012, en présence de représentants japonais du JAEA (*Japon atomic energy agency*) et européens de F4E (*Fusion for energy*), l'injecteur du projet Ifmif-Eveda a atteint la grande majorité des performances demandées, tant sur le plan des caractéristiques du faisceau que sur le plan de la gestion des sécurités de la machine et du personnel. Le système de contrôle a également été approuvé. Les résultats obtenus ont permis d'atteindre une puissance record pour un tel faisceau : en mode continu, la puissance du faisceau a atteint 17 kW à la sortie de la source (170 mA d'ions deutérium à 100 kV), et le courant d'ions D⁺ a atteint 140 mA, soit 14 kW, derrière le cône d'entrée du quadripôle à radiofréquence (RFQ). De plus, en mode pulsé, les mesures d'émittance effectuées avec des faisceaux de 100 à 150 mA ont montré que la qualité du faisceau répond aux conditions requises à l'entrée de cavité accélératrice du type RFQ.



Émittance d'un faisceau pulsé de 140 mA - 100 keV.

À la fin de ces tests, F4E, JAEA et le responsable du projet ont décidé le transfert de l'injecteur sur le site de Rokkasho, au Japon, dès le début de 2013. L'injecteur sera le premier élément de l'accélérateur qui sera installé sur le site japonais. Cette installation sera conduite par les équipes de JAEA avec une participation très active des agents du CEA. Le redémarrage du faisceau est prévu à la fin de l'été 2013.

Le cryomodule

Le cryomodule de l'accélérateur prototype Ifmif permettra d'accélérer jusqu'à une énergie de 9 MeV le faisceau de deutons sortant du RFQ à 5 MeV. Il comporte 8 cavités supraconductrices à 175 MHz munies de coupleurs de puissance qui transféreront en continu 70 kW au faisceau. Huit solénoïdes supraconducteurs sont disposés entre chaque cavité pour assurer la focalisation. Le laboratoire espagnol Ciemat, partenaire de la collaboration, est en charge des solénoïdes et de leurs amenées de courant.

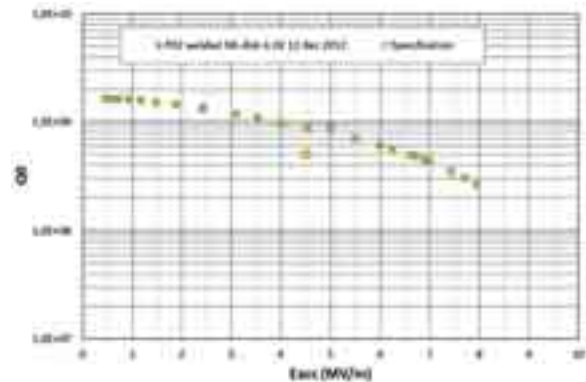


Vue d'ensemble du cryomodule de l'accélérateur Ifmif-Eveda.

Les cavités prototypes de type résonateur demi-onde (HWR pour *half-wave resonator*) en niobium ont été livrées au CEA fin 2010. Parallèlement aux premiers tests en radiofréquence dans un cryostat vertical, des études complémentaires couplant des simulations RF et des simulations thermiques ont été réalisées. De plus, de nouvelles études mécaniques ont été effectuées afin d'assurer la conformité de la cavité à la réglementation japonaise sur les appareils en pression. C'est en particulier à la suite de ces études que le design du système d'accord en fréquence a évolué vers un système par déformation élastique de la cavité proche de celui de Spiral2. Une cavité prototype compatible avec ce système d'accord a été qualifiée en décembre 2012, montrant des performances au-delà des spécifications : le champ accélérateur a atteint 8 MV/m (spécification : $E = 4,5$ MV/m), et le facteur de qualité nominal a été obtenu (spécification : $Q_0 = 5 \times 10^8$ à 4,5 MV/m).



Cavité prototype modifiée.



Résultats de tests de la cavité prototype modifiée.

Parallèlement, certaines évolutions du cryomodule ont été effectuées : allongement du cryomodule, optimisation du circuit de pompage, système d'alignement. À ce stade, l'étude détaillée du cryomodule est disponible.

Le marché pour l'étude et la réalisation de l'ensemble des coupleurs de puissance a été lancé en 2009 et attribué à la société américaine CPI. Le SACM a assuré le suivi de l'étude, de la fabrication et des mesures sur les composants et sur les prototypes qui ont été livrés au CEA en juin 2012. Ils ont depuis été préparés en salle blanche, afin d'être envoyés à Ciemat qui est en charge du conditionnement des coupleurs de puissance RF.

Pendant l'année 2013 seront lancés en fabrication la série de coupleurs après conditionnement RF des prototypes, ainsi que différents composants du cryomodule (enceinte à vide avec écrans thermiques, circuiterie d'hélium, écran magnétique, cadre support). L'approvisionnement du niobium est en cours afin de lancer en fabrication des cavités HWR de série.



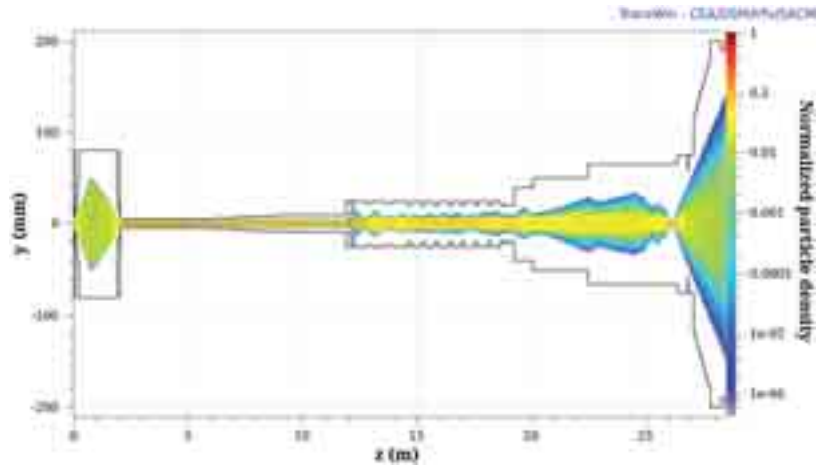
Coupleur de puissance prototype.

Simulations de la dynamique du faisceau

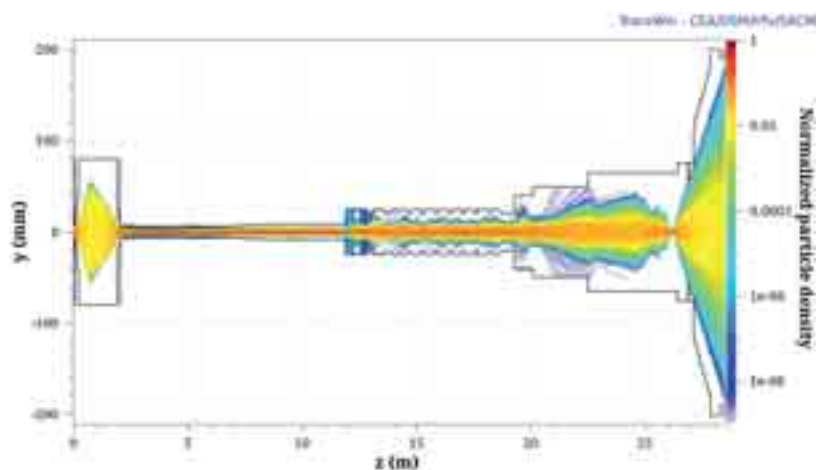
Le faisceau de deutons de l'accélérateur d'Ifmif présente deux caractéristiques sans précédent : une puissance de 5 MW et une intensité de 125 mA en mode continu. Ceci conduit à de nouveaux défis dans la conception et les optimisations de la dynamique du faisceau : des pertes qui doivent être inférieures à 10^{-6} fois l'intensité totale du faisceau, une dynamique non linéaire induite par d'importantes forces de charge d'espace, des difficultés d'implantation des équipements et des diagnostics dues à une structure de machine très compacte. Dans ce contexte, une stratégie spécifique de réglage de l'accélérateur basée sur la minimisation des pertes a été mise en place par simulation, notamment pour les sections de la machine où l'énergie du faisceau est supérieure à 5 MeV.

Les études de la dynamique du faisceau sont dans un premier temps réalisées de manière indépendante pour chaque sous-système de l'accélérateur : la ligne à basse énergie (LBE), le quadripôle à radiofréquence (RFQ), la ligne à moyenne énergie (MBE), le linac supraconducteur et la ligne à haute énergie (LHE). En dernier lieu, une simulation de l'ensemble de l'accélérateur Ifmif-Eveda est réalisée, depuis l'extraction de la source d'ions jusqu'à la fin de la ligne à haute énergie (arrêt du faisceau).

Afin de valider la conception et les réglages de l'accélérateur Ifmif-Eveda, des simulations sont effectuées en incluant des erreurs statiques et dynamiques sur les différents éléments de la machine. Les erreurs statiques représentent les erreurs d'alignement des éléments accélérateurs et de focalisation. Dans ce cas, la trajectoire du faisceau peut être corrigée par des déviateurs associés à des moniteurs de position placés de manière stratégique le long de la machine. Les erreurs dynamiques représentent des phénomènes vibratoires ou des variations rapides des alimentations ; ces erreurs possèdent donc des constantes de temps trop rapides pour être corrigées. On constate que les pertes du faisceau restent acceptables, même en considérant des valeurs d'erreurs conservatives.



Densité du faisceau le long de l'accélérateur Ifmif-Eveda.



Densité du faisceau cumulé pour 500 machines, avec application d'erreurs aléatoires sur les machines.

Station de tests en radiofréquence

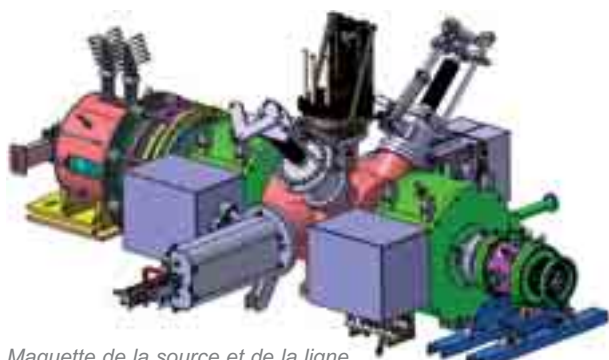
La casemate Ifmif-ESS d'une surface au sol de 18 m x 5 m réalisée dans le hall du bâtiment 126 du CEA Saclay pourra accueillir les tests du RFQ et du cryomodule. Une épaisseur de mur de 1,5 m assure la protection biologique. L'installation dispose d'une puissance électrique de 800 kW et d'une eau de refroidissement d'un débit de 80 m³/h à 22 °C. Elle devra être équipée d'une source RF de 200 kW à la fréquence de 175 MHz.

L'accélérateur linéaire à protons de Fair

Le projet Fair (*Facility for antiproton and ion research*) de GSI (Allemagne), rassemble plusieurs thématiques de physique autour d'une même installation : la physique des noyaux exotiques, la physique hadronique avec les collisions proton-antiproton, l'étude des réactions d'ions lourds relativistes (quelques dizaines de GeV par nucléon), la physique des plasmas et la physique atomique. Le SACM contribue plus particulièrement à l'accélérateur linéaire (linac) à protons de Fair avec le développement et la réalisation de la source d'ions et de la ligne à basse énergie, des aimants de la ligne à haute énergie et des 14 moniteurs de position du faisceau. Pour ces derniers l'Irfu a la responsabilité de la conception et de la réalisation des calculs de radiofréquence, de la fourniture des préamplificateurs et des câbles de raccordement à l'électronique, des tests à l'aide d'un banc dédié à Saclay.

Source d'ions et ligne de transport à basse énergie

La source d'ions, associée à une ligne de transport à basse énergie, doit générer et transporter un faisceau de 100 mA de protons à une énergie de 95 keV avec une émittance inférieure à $0,30 \pi \cdot \text{mm.mrad}$. La source d'ions choisie est de type source à résonance cyclotronique électronique (ECR) de 2,45 GHz, basée sur la conception de la source Silhi développée par le CEA Saclay. Elle fonctionnera en mode pulsé, à une fréquence de 4 Hz.



Maquette de la source et de la ligne à basse énergie du linac à protons.
En rose à gauche : la source d'ions.
En vert : les deux solénoïdes.

La ligne à basse énergie est similaire à celle de l'injecteur d'Irfmif : elle est très compacte et le transport et la focalisation du faisceau sont réalisés par deux solénoïdes équipés de correcteurs dipolaires afin d'optimiser l'injection du faisceau dans le quadripôle à radiofréquence. La ligne à basse énergie comprendra également un ensemble de diagnostics (émittance-mètre, filtre de Wien, profileur, transformateur de courant) afin de caractériser le faisceau produit.

Aimants de la ligne à haute énergie

Ce lot concerne deux dipôles courbés à 45° et deux quadripôles de focalisation pour la ligne d'injection vers le synchrotron SIS18 de Fair. Le cahier des charges a été écrit par l'Irfu selon les spécifications de GSI et la fabrication des aimants a été confiée à la société Sigmaphi



Plateforme à haute tension de l'injecteur du linac à protons installé à Saclay.

(France) avec un suivi de fabrication effectué par l'Irfu. Les mesures magnétiques de qualification des aimants ont été effectuées par le fabricant et les aimants ont été livrés à GSI à la fin de l'année 2012.



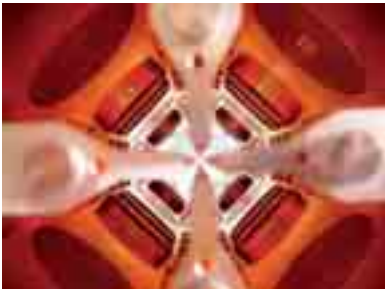
Quadripôle de la ligne de transfert à haute énergie (crédit Sigmaphi).

Diagnostics : moniteurs de position du faisceau

Les 14 moniteurs de position du faisceau qui seront installés le long du linac doivent mesurer la position transverse, le courant relatif du faisceau et son énergie par une méthode de temps de vol. De plus, ils doivent être compacts, respecter les propriétés du vide, laisser une ouverture faisceau soit de 30 mm soit de 50 mm et disposer d'une réponse sur une large bande. La résolution spatiale doit être meilleure que 0,1 mm sur l'ensemble du paquet ($36 \mu\text{s}$) et celle de la mesure de phase doit être d'au moins 1° ce qui correspond à une résolution temporelle de 8,5 ps.

Le quadripôle à radiofréquence du Linac4

Le but du projet Linac4 est de réaliser un accélérateur linéaire d'ions H^- à 160 MeV qui remplacera l'accélérateur Linac2 en tant qu'injecteur du *Proton synchrotron booster* (PSB). Ce nouvel accélérateur linéaire permettra d'améliorer d'un facteur 2 la luminosité du faisceau en sortie du PSB, rendant ainsi possible l'augmentation du courant dans l'ensemble des injecteurs du LHC, et finalement l'augmentation de la luminosité dans le LHC. Le Linac4 sera installé dans un nouveau tunnel, et connecté à la ligne de transfert vers le PSB. Il comportera une source d'ions H^- , un quadripôle à radiofréquence (RFQ), un hacheur, et un ensemble de cellules accélératrices, pour une longueur totale de 86 mètres. Le RFQ a été conçu par le SACM, réalisé par le Cern et réglé sur site par l'équipe du CEA. Il est en cours de conditionnement à la station de test de 3 MeV avant le transfert à son emplacement final prévu pour la fin 2013.



Vue intérieure du tronçon TR1. Certains pistons de réglage (un au premier plan en haut à droite, et quatre à l'arrière-plan) sont équipés de boucle de mesure du champ RF. Les quatre ports de pompage sont également visibles.

Le RFQ du Linac4 fonctionne à 352,2 MHz et doit délivrer un faisceau de 80 mA à 3 MeV en mode pulsé. Utilisant la technologie développée pour lphi, il est constitué d'un seul segment de trois mètres, réalisé en trois tronçons d'un mètre. Trente-deux pistons de réglage permettent d'obtenir la tension inter-électrode désirée (78,27 kV) avec une précision de l'ordre de un pour cent. La puissance radiofréquence (RF) est couplée au moyen d'un iris, précédé d'un transformateur d'impédance en guide d'onde nervuré. La puissance injectée sera de l'ordre de 600 kW, pour une puissance instantanée du faisceau de 210 kW.

Après sa conception par le SACM, ce RFQ a été entièrement réalisé par le Cern. Les contrôles RF effectués à chaque étape de fabrication de chacun des trois tronçons (assemblage des quatre électrodes en cuivre, premier brasage de ces électrodes, puis brasage des brides de fixation) ont permis de montrer que les dimensions critiques pour le fonctionnement étaient à l'intérieur des enveloppes spécifiées. Le réglage RF proprement dit a commencé en août 2012 pour s'achever en février 2013, et comprend, en omettant les détails, cinq étapes :

- Le réglage des plaques de fermeture est réalisé au moyen de petites barres qui pénètrent à l'intérieur de la cavité. Après réglage, ces éléments ajustables en aluminium sont remplacés par les plaques définitives en cuivre.
- Lors de la seconde étape, les trente-deux pistons et les quatre ports RF fantôme sont ajustés afin d'obtenir la loi de tension (ici, une constante) et la fréquence désirées.



Tronçon TR2 en cours de caractérisation en radiofréquence.

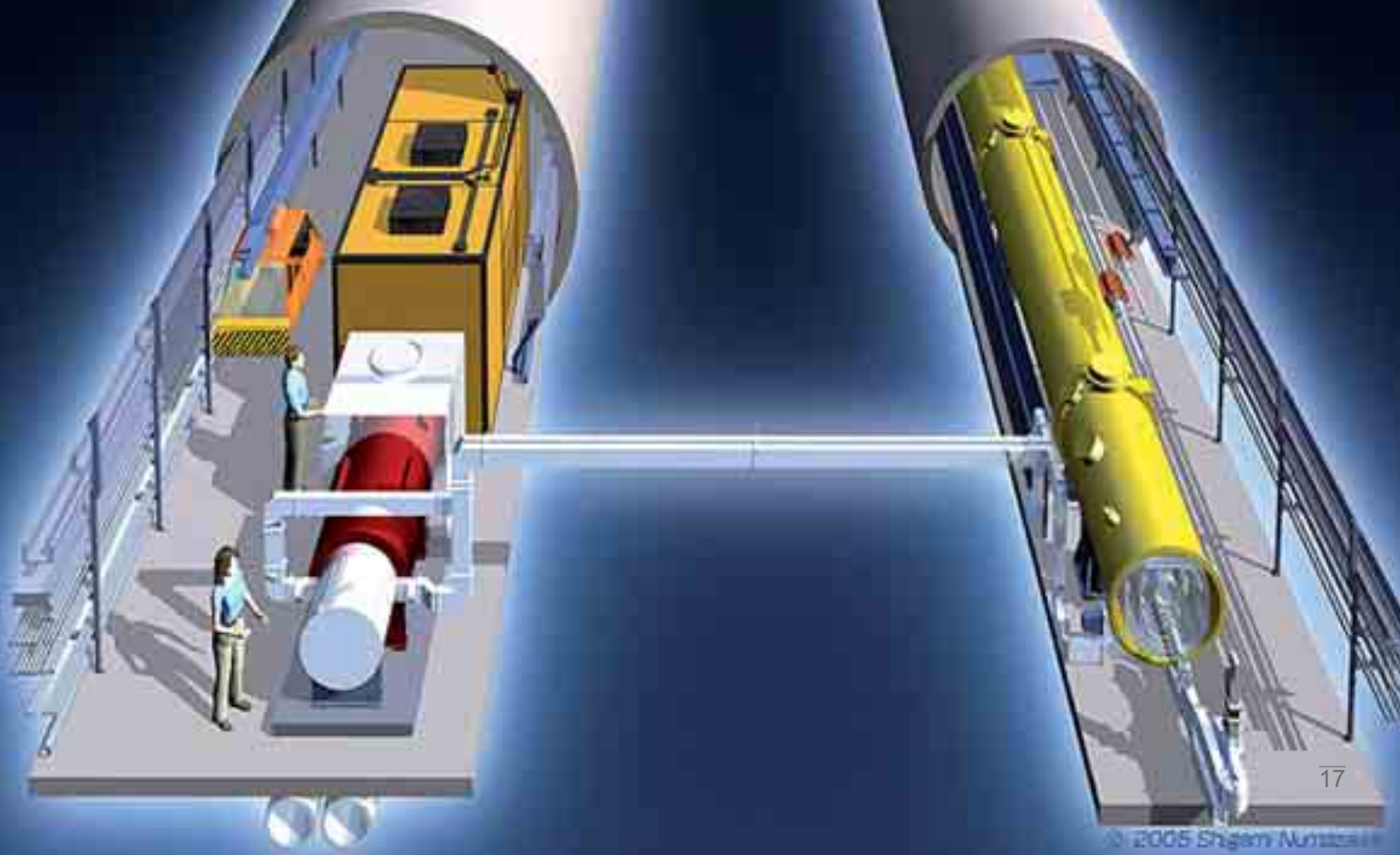
- Il faut ensuite remplacer l'un des ports RF fantôme par l'iris de couplage (il y a quatre ports fantômes pour des raisons de symétrie), et ajuster les dimensions de cet iris ainsi que sa profondeur de pénétration dans le RFQ. L'iris de couplage définitif, en cuivre, est usiné, brasé et mis en place.
- Le réglage des pistons est ensuite repris pour compenser d'éventuelles variations de tension induites par l'iris.
- Les pistons en cuivre définitifs sont usinés et installés, et les caractéristiques RFQ obtenues sont enregistrées.

La fréquence de résonance nominale a été obtenue après mise sous vide ; l'indice de réfraction de l'air induit un décalage d'environ 100 kHz, qui a été correctement anticipé. Les erreurs résiduelles de la loi de tension sont de l'ordre de 0,5 % pour la composante quadripolaire, et de 3 % pour les composantes dipolaires. Le conditionnement a été commencé avec des impulsions de 60 μ s, et la puissance nominale a été atteinte. La longueur d'impulsion sera ensuite progressivement augmentée jusqu'à la valeur nominale (400 μ s). Les premiers tests avec faisceau auront lieu en 2013.



Plaques de fermeture en cuivre et leurs barres de réglage quadripolaire.

Accélérateurs linéaires d'électrons et positons



Le collisionneur Clic

Clic (*Compact linear collider*) est un projet de collisionneur linéaire d'électrons-positons pour la physique des très hautes énergies. C'est un candidat potentiel pour succéder aux expériences du LHC (*Large hadron collider*). Le collisionneur Clic vise une énergie de collision de 0,5 à 3 TeV et une luminosité de $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ sur une distance de 15 à 50 km. Il s'appuie sur un concept novateur d'accélération à deux faisceaux à la fréquence de 12 GHz avec un gradient accélérateur élevé de 100 MV/m. Ce nouveau concept est étudié expérimentalement sur la plateforme d'essai CTF3 (*Clic test facility*) au Cern.

Validation expérimentale du principe d'accélération à deux faisceaux

L'injecteur à électrons Califes de CTF3 qui simule le faisceau principal de Clic a fourni un faisceau de 170 MeV à 200 MeV entre 2010 et 2012 avec une fiabilité et une reproductibilité croissantes. Une première accélération à deux faisceaux avec une cavité accélératrice à 12 GHz du Cern a pu être démontrée en décembre 2010 en collaboration avec l'université d'Uppsala (Suède). De nombreuses mesures de caractéristiques du faisceau accéléré et de signaux de puissance radiofréquence transmis et réfléchis ont été effectuées. Des analyses statistiques poussées de la production de claquages dans les cavités ont été mises en œuvre pendant toute cette phase de fonctionnement afin de mieux comprendre les limitations de ce nouveau principe d'accélération.



Banc de test à deux faisceaux dans le hall d'expérience de CTF3 au Cern (crédit Cern).

Structures accélératrices à 12 GHz

En parallèle, deux structures accélératrices à 12 GHz ont été conçues et réalisées par les équipes du SACM et du SIS en étroite collaboration avec le Cern et les entreprises Mecachrome et Thales. Ces cavités nécessitent une très grande précision d'usinage et un processus très contrôlé d'assemblage par diffusion qui s'effectue à haute température sous atmosphère d'hydrogène. Ces deux structures accélératrices ont la particularité d'avoir leurs propres détecteurs de position du faisceau d'électrons. Ces détecteurs appelés *wakefield monitors* permettent un alignement avec une

Deux structures accélératrices de 12 GHz à haut gradient après assemblage par diffusion à 1000°C sous atmosphère d'hydrogène à 1 bar.

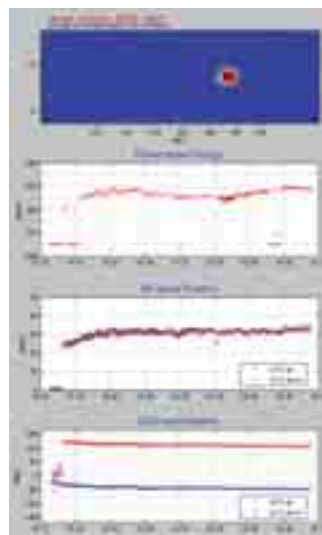


précision de 10 μm et seront indispensables sur la future machine Clic pour atteindre la forte luminosité demandée. La mise en fonctionnement de ces deux structures sur CTF3 a été effectuée en septembre 2012. Un gradient accélérateur de 80 à 100 MV/m a déjà pu être démontré expérimentalement et les premières mesures de position issues des signaux des *wakefield monitors* sont très prometteuses.

Station d'essai à 12 GHz

Une station d'essai à 12 GHz a été mise en œuvre au Cern entre 2010 et 2012. Cet équipement de pointe permet de mener des études de conditionnement et des mesures de performances des structures accélératrices à 12 GHz sur une durée de fonctionnement de 2 à 3 mois par structure. Le SACM a contribué de façon importante

au développement et à la mise en opération de cette station d'essai, en particulier par la fourniture du modulateur à haute tension de 400 kV et la conception de nombreux composants RF de puissance.



Mesure de l'accélération du faisceau sonde de Califes par les deux structures accélératrices à 12 GHz à l'aide d'un spectromètre. Sur cet exemple, un gain en énergie de 20 à 25 MeV est mesuré, soit un gradient moyen accélérateur de 50 à 62,5 MV/m sur une longueur active de $2 \times 0,2 \text{ m}$.

La source de lumière XFel

Le projet *European X-ray free electron laser* (E-XFel) utilisera un faisceau d'électrons de 17,5 GeV pour créer une source de rayons X de 4^e génération, un million de fois plus intense que les sources basées sur un synchrotron. Située à Hambourg (Allemagne), près de Desy, elle permettra d'explorer de nouveaux domaines de chimie, de biologie et de science des matériaux nécessitant des faisceaux intenses et ultra-courts (sub-picoseconde). L'Irfu participe à la construction de l'accélérateur linéaire de XFel en association notamment avec Desy, l'IN2P3 et l'INFN, en assurant l'intégration de l'ensemble des 103 cryomodules accélérateurs sur le site de Saclay ainsi que la fabrication d'un tiers des moniteurs de position du faisceau.

Moniteurs de position du faisceau

Le SACM a la responsabilité de l'étude, de la réalisation et de la mise en place de 31 moniteurs de position (BPM pour *beam position monitor*), dits BPM ré-entrants. Le BPM est composé d'une cavité ré-entrante munie de quatre antennes et de son électronique analogique. Le faisceau passant à travers la cavité excite des modes électromagnétiques qui génèrent des signaux sur les 4 antennes montées sur la cavité. Ces signaux sont transmis à l'électronique associée et permettent de donner une mesure de la position et une mesure de l'intensité du faisceau à l'endroit considéré de la machine.

Les moniteurs seront intégrés dans un tiers des cryomodules de la machine XFel. Ils seront connectés aux quadripôles en salle blanche à Desy, puis envoyés sur le site de Saclay pour leur assemblage sur le train de cavités. Ils doivent respecter les propriétés de vide et les procédures de nettoyage afin de pouvoir travailler dans un environnement ultrapropre, à une température de 4 K. Pour réduire les pertes cryogéniques, un cuivrage du tube faisceau est effectué. Le diamètre du tube faisceau est de 78 mm et la longueur du moniteur de 170 mm.



BPM ré-entrant monté dans un cryomodule prototype de XFel.



Électronique analogique du BPM de XFel.

L'électronique de ce système, basée principalement sur un traitement analogique du signal réalisé par le CEA, est intégrée dans un châssis commun à tous les BPM de la machine XFel développé par l'institut PSI (*Paul Scherrer Institute*). La résolution temporelle du système, d'environ 40 ns, permet de faire des mesures paquet par paquet. La résolution spatiale demandée est de 50 μm .

Afin de valider le moniteur et son électronique, une cavité BPM ré-entrante a été installée dans un cryomodule prototype XFel et une autre sur l'accélérateur linéaire Flash (*Free electron laser in Hamburg*) permettant ainsi d'effectuer des tests avec un faisceau.

Intégration des cryomodules

Pour assurer l'intégration des cryomodules, le SACM a développé une infrastructure de montage, appelée « Village XFel », qui a été mise à la disposition d'un opérateur industriel pendant les 3 années nécessaires à cette opération.

Cette infrastructure, dont le plan a été affiné au cours de l'année 2008 dans le cadre des études préliminaires, inclut trois halls de montage. Optimisée pour permettre la production d'un cryomodule par semaine, l'implantation d'une chaîne de 7 postes de travail permet l'intégration progressive pendant 7 semaines des éléments du cryomodule, en commençant par l'assemblage dans la grande salle blanche de 8 cavités accélératrices supra-conductrices en un train de 12 mètres de long. Les autres postes de montage sont consacrés, entre autres,

à l'alignement des cavités, à leur insertion dans un cryostat et au montage des 8 coupleurs de puissance radiofréquence.

L'installation a été qualifiée en 2011 et 2012, lors d'une phase de prototypage qui a consisté en trois montages de cryomodules. Depuis septembre 2012, l'Irfu accueille une partie de l'équipe industrielle qui intégrera les modules à partir de mars 2013.



Le train de cavités équipées de superisolant, du blindage magnétique et du système d'accord de fréquence est suspendu à la distribution cryogénique. L'ensemble est transporté de poste en poste par des portiques (en rouge).



Les coupleurs de puissance permettant de transmettre la puissance à la cavité et au faisceau sont composés de deux parties ; la partie fonctionnant à température cryogénique (manipulée par l'opérateur) est assemblée dans la salle blanche (ISO4).



Le cryomodule est équipé de tous ses composants ; la ligne de pompage des coupleurs est en cours de pompage.



Le train constitué de huit cavités, huit soufflets, un quadripôle, un moniteur de position du faisceau, fermées par deux vannes tiroir, est assemblé dans la salle blanche alternativement sur l'un des deux rails. Des contrôles électriques, mécaniques et d'étanchéité sont effectués tout au long du montage.

Source de positons pour l'expérience GBar

La source de positons de haute intensité, installation Sophi (Source de positons de haute intensité), est la plateforme expérimentale de l'expérience GBar (*Gravitational behavior of antimatter at rest*) du Service de physique des particules dédiée à la mesure de la constante gravitationnelle de l'antimatière. Elle a été complétée d'un piège pour l'accumulation des positons et d'une ligne de déviation destinée aux développements de matériaux.

La source Sophi

Les positons sont produits par interaction des électrons avec une cible en tungstène, puis modérés et guidés par un système magnétique. L'originalité du système vient de la faible énergie des électrons incidents. Le faisceau de positons ainsi produit a une forte dispersion en énergie et en impulsion. La difficulté réside dans la capture de ces positons et dans leur séparation des électrons qui sont encore 1000 fois plus nombreux que les positons.



La source de positons de haute intensité Sophi.

Installé depuis 2007 dans le bâtiment 126 du CEA Saclay, hall de l'ancien accélérateur Saturne, la source est alimentée par un accélérateur linéaire d'électrons de 3 MeV. Basé sur un concept breveté par les physiciens Patrice Perez et André Rosowsky, ce démonstrateur a été financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) en 2005, et le Conseil général de l'Essonne en 2006. Après plusieurs années de mise au point, il est opérationnel depuis 2010.

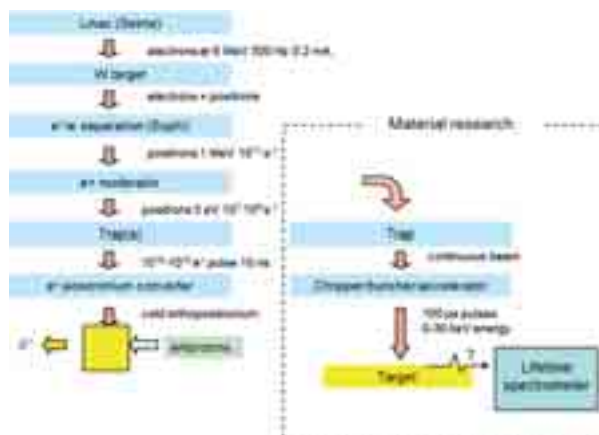
Transport des positons et piège magnétique

Un système magnétique de guidage permet d'extraire les positons de la casemate de protection radiologique et de supprimer le caractère impulsif du flux de positons provenant de la structure temporelle de l'accélérateur d'électrons.

En 2011, grâce au financement par l'ANR du projet Positrap, un piège magnétique de stockage des positons prêté par l'institut japonais Riken a été installé et remis en service sur la ligne principale de production des positons.

Utilisation des positons en sciences des matériaux

En parallèle, des études ont été menées en collaboration avec les équipes du professeur André Rubbia basées au Cern pour identifier les matériaux capables de générer beaucoup de positronium. Les positons sont utilisés en science des matériaux comme des sondes pour caractériser la taille des défauts ponctuels dans les structures cristallines. La source réalisée pourrait à terme être une solution de remplacement pour les sources de sodium 22 qui fournissent en positons ces applications de caractérisation en science des matériaux.



Les principes expérimentaux pour réaliser l'antihydrogène et pour les applications en sciences des matériaux.

Collaboration GBar

La finalité de l'expérience GBar est d'identifier le signe et de mesurer l'intensité de l'accélération de la pesanteur terrestre pour l'antimatière. Dans les cas extrêmes des modèles lui laissant la possibilité d'être négative, cela se traduirait par une élévation et non une chute d'un atome d'antimatière soumis à la seule force de la gravité terrestre. La proposition d'expérience soumise au Cern en 2011 a été acceptée par le *research board* en mai 2012, et la collaboration comprenant 12 instituts européens est en train de rechercher le reste des financements nécessaires.



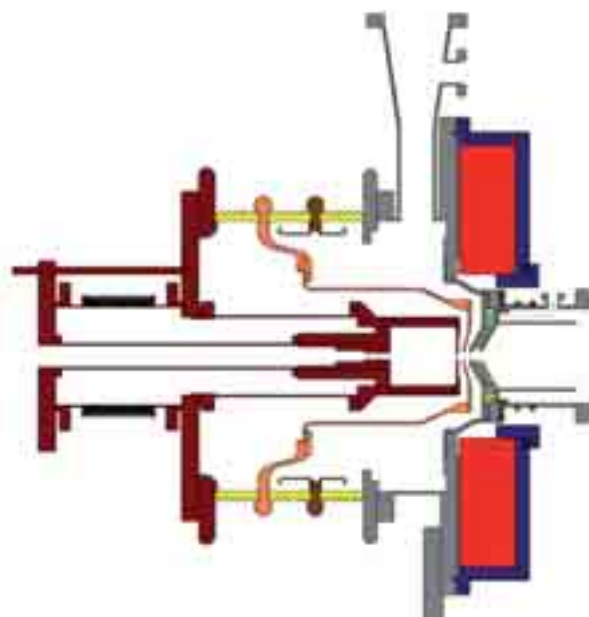
**Développements
pour les accélérateurs
de particules du futur**

Étude et tests des sources d'ions

Dans le domaine des accélérateurs à fort courant, de nombreux projets requièrent des faisceaux d'ions légers (protons ou deutons) de haute intensité. Toutes ces machines, en cours de construction ou en projet, demandent une source d'ions fiable et produisant des faisceaux intenses, stables et d'excellente qualité. Les développements effectués ont démontré les capacités du SACM à concevoir et construire des sources d'ions positifs opérationnelles répondant aux besoins annoncés. Grâce à ces résultats, le CEA a assuré la construction des sources de deutons pour équiper Spiral2 et Ifmif.

La poursuite des développements est nécessaire pour continuer à accroître les performances de ces sources et les qualités optiques du faisceau extrait (diminution de la divergence et de l'émittance du faisceau). Le couplage entre l'onde hyperfréquence et le plasma est un des points essentiels qu'il faut mieux comprendre. Ces développements s'effectuent dans le cadre de la plateforme de recherche Profiil (Plateforme de recherche et d'optimisation de faisceaux intenses d'ions légers) à l'aide du banc d'étude et de tests des sources d'ions, Betsi, qui permet depuis 2006 de produire et d'analyser des faisceaux intenses en mode pulsé ou continu.

Dernièrement une nouvelle source nommée Alises (*Advanced light ion source and extraction system*), à bobine unique référencée au potentiel du laboratoire, a été développée et a montré une très bonne tendance en termes de rendement en puissance hyperfréquence, puisqu'elle a démarré avec moins de 60 W de puissance HF. Cette source dédiée à la R&D a permis de tester plusieurs paramètres, comme l'influence de la longueur et du rayon de la chambre à plasma, sur la production des ions légers. Les tests ont été menés sur le banc Betsi et ont fait partie intégrante d'une thèse. De nombreux résultats ont donné lieu à des publications scientifiques et à un brevet CEA. Ces résultats indiquent, entre autres, que l'on peut aller vers une chambre à plasma plus petite ouvrant ainsi la perspective d'une miniaturisation de la source, et que l'on peut optimiser le couplage entre l'hyperfréquence et le plasma, ce qui permettra de réduire le besoin en puissance HF.



Coupe de la source Alises.
En rouge : le solénoïde de courte longueur, près de la zone d'extraction, crée la résonance dans la chambre à plasma.



Source Alises, mise en place sur le banc de tests Betsi.

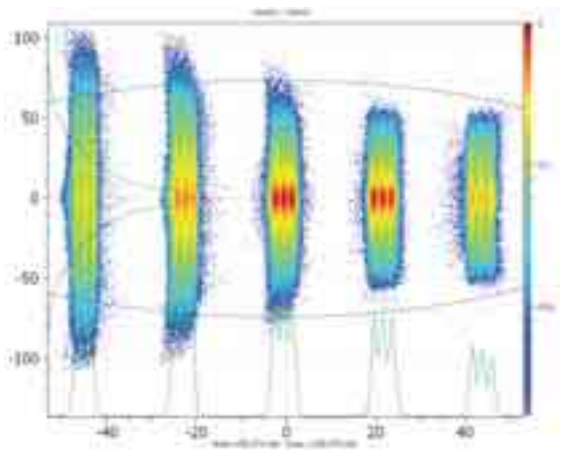
Simulation de la dynamique des faisceaux de particules

La dynamique des faisceaux est l'étude du mouvement de particules chargées dans des champs électromagnétiques statiques ou dynamiques. Ces champs peuvent être externes ou bien générés par la distribution des particules. Pour les électrons, l'effet du rayonnement synchrotron doit être considéré. Les défis à relever pour une modélisation fidèle de la dynamique du faisceau sont divers. Sur le plan fondamental, citons la prise en compte de l'interaction avec le gaz résiduel, de l'interaction avec les interfaces solides, la dynamique des plasmas dans les sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électromagnétiques d'ordres élevés (hexapôles, octupôles), la maîtrise de la formation du halo et des pertes du faisceau pour la maintenance des futurs accélérateurs de puissance. Ces défis nécessitent la mise au point de modèles analytiques ainsi que le développement de codes de calcul et de méthodes numériques utilisant au mieux les ressources informatiques. Finalement, les confrontations expérimentales permettent de valider et d'améliorer les modèles utilisés.

Simulation du faisceau dans les sources à résonance cyclotronique électronique

Depuis près de dix ans, l'émergence de nombreux projets a incité le CEA et le CNRS à collaborer dans le domaine des accélérateurs à fort courant et notamment à développer un démonstrateur de basse énergie, l'injecteur de protons à haute intensité Iphi. Parmi ces projets, on peut citer Spiral2 à Ganil (Caen) ou Ifmif qui souhaitent des faisceaux de deutons, le projet Fair à GSI (Allemagne), le projet ESS à Lund (Suède) ou les réacteurs hybrides qui souhaitent des protons. D'autres projets, comme le SPL au Cern, le *proton driver* à Fermilab ou les sources de spallation nécessitent des ions hydrogène négatifs qui seront ensuite injectés dans des anneaux de compression. Toutes ces machines demandent une source d'ions performante et fiable que le SACM est à même de concevoir et de construire.

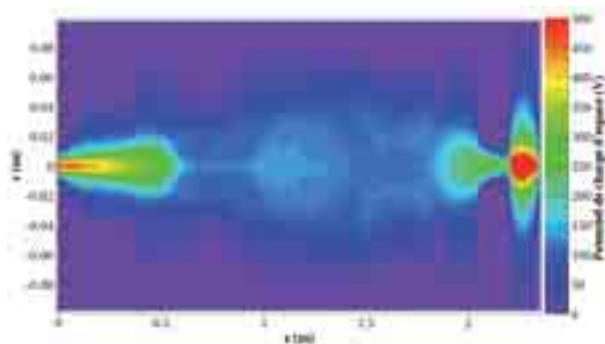
La modélisation du système d'extraction des particules de la source est effectuée en calculant le ménisque d'expansion du plasma et la génération du faisceau à travers un système d'extraction multi-électrode.



Distribution transverse au plan final de détection du spectromètre S^3 du projet Spiral2. On observe la séparation de trois isotopes d'un élément superlourd ($Z = 116$ et $A = 291, 292, 293$) avec cinq états de charge. Chaque groupe de taches représente les trois isotopes pour un état de charge. Le calcul utilise la géométrie de S^3 avec les cartes de champ pour tous les éléments magnétiques simulés.

Transport de particules dans les lignes à basse énergie

Le rôle de la ligne à basse énergie d'un accélérateur est de transporter le faisceau de particules depuis l'extraction de la source d'ions et d'optimiser son injection dans les sections accélératrices. Dans le cas des accélérateurs à haute intensité comme Ifmif ou Iphi, l'enjeu principal est de réaliser le transport du faisceau en limitant ses pertes ainsi que l'augmentation de son émittance. La dynamique des faisceaux intenses est dominée par des effets non linéaires du champ de charge d'espace. Dans une ligne à basse énergie, le faisceau induit l'ionisation des atomes du gaz résiduel de la chambre à vide, ce qui entraîne une compensation partielle de la charge d'espace. Afin de prendre en compte ces effets, le code de calcul SolMaxP développé au SACM permet la simulation du transport de faisceaux en régime de compensation de charge d'espace.



Carte de potentiel de charge d'espace dans la ligne à basse énergie du linac à protons de Fair. L'abscisse $z = 0$ correspond à l'extraction de la source ECR. La zone non compensée en charge d'espace (potentiel $\sim 500V$) pour les abscisses supérieures à 2,2 m correspond à l'injection du faisceau dans le quadripôle à radiofréquence.

Les codes SolMaxP et Tracewin ont été utilisé conjointement pour réaliser la conception et l'optimisation de la ligne à basse énergie de l'accélérateur de deutons d'Ifmif et pour les études préliminaires de la ligne à basse énergie du linac à protons de Fair. Dans les deux cas, le faisceau est focalisé par deux solénoïdes et la ligne de faisceau a été conçue aussi compacte que possible (environ 2 m) afin de limiter l'augmentation de l'émittance. Des mesures des caractéristiques du faisceau des lignes à basse énergie de Silhi et d'Ifmif ont été réalisées dans le but de disposer de données expérimentales pour valider le code SolMaxP.

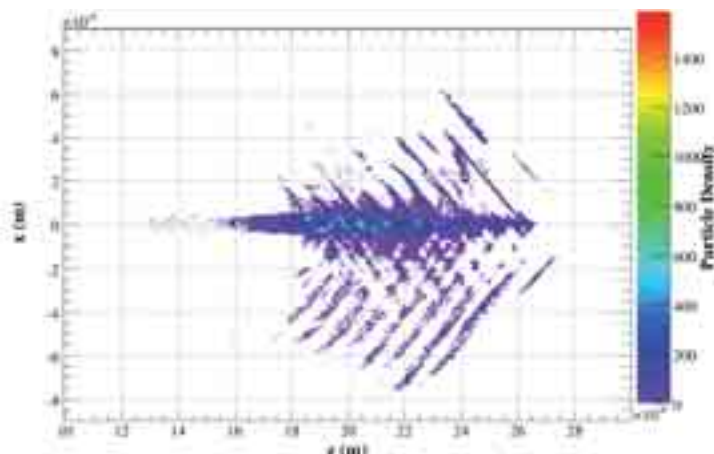
Transport de particules dans les parties à moyenne et à haute énergie

Au-delà du quadripôle à radiofréquence, les problématiques liées à la charge d'espace sont plus réduites mais le contrôle des niveaux des pertes de faisceau devient essentiel pour des questions de puissance dissipée dans les parties cryogéniques et d'activation des structures. Le défi dans les machines à haute puissance, parfois de plusieurs mégawatts, est d'atteindre les précisions de calcul nécessaires permettant d'estimer des probabilités de pertes très faibles, souvent bien inférieures à une puissance d'un watt. Le SACM a intensifié son effort de développement de codes de simulation capables, d'une part, de définir les machines les plus performantes possible et, d'autre part, de mener des simulations massives prenant en compte une description aussi réaliste que possible de l'accélérateur et des erreurs de construction et de réglage. Des études de fiabilité doivent aussi permettre d'évaluer les effets d'une défaillance d'un ou de plusieurs éléments de l'accélérateur et éventuellement les moyens d'en réduire les conséquences.

Le SACM est impliqué dans de nombreux projets mettant en œuvre l'ensemble de ces compétences, citons Ifmif, Beta-beams, Myrrha, Eurisol, Linac4, SPL, ESS, Spiral2, ILC, S³ pour les principaux.

Accélération laser-plasma

Le SACM est impliqué dans des projets d'accélération de particules par une onde de plasma créée par le sillage d'un laser, tel que Cilex (Centre interdisciplinaire de lumière extrême) dont les premiers tirs de laser sont prévus à l'horizon 2016. Le SACM participera à deux niveaux : d'une part, à la définition de lignes de transfert avec ses diagnostics entre les différents étages de l'accélération et, d'autre part, aux simulations de l'interaction du laser avec le plasma. Le second point permet de valoriser l'expérience déjà acquise dans le développement de codes PIC (*particules in cell*). Des premières simulations ont été réalisées avec succès grâce au code SolMaxP pour retranscrire l'accélération d'ions lorsqu'une couche de quelques nanomètres est frappée par un laser intense.



Densité des électrons de plus de 1,5 MeV à $t = 107$ fs. La cible est initialement à $x = 0$. L'impulsion laser arrive avec un angle d'incidence de 30° sur une cible fine de 30 nm d'hydrogène. L'oscillation du plasma dans la cible est clairement visible. De plus, les électrons éjectés hors de la cible prennent une disposition en front d'onde correspondant à l'onde laser.

Amélioration du LHC

Le SACM contribue aux études de la dynamique du faisceau entreprises pour augmenter d'un facteur 5 la luminosité du LHC à l'horizon 2020. Grâce à l'approche dite ATS (*achromatic telescopic squeezing*) développée par S. Fartoukh du Cern, cette amélioration ne modifiera que deux régions d'interactions. Ainsi, les quadripôles des triplets de focalisation finale, actuellement en technologie NbTi, devront être remplacés par des quadripôles utilisant la technologie Nb₃Sn. Elle nécessitera aussi l'utilisation de cavités à radiofréquence en crabe à même de compenser l'angle de croisement des faisceaux. Le SACM participe à la définition de la maille et a proposé une structure permettant de réduire de 25 % la tension requise pour les cavités. Le SACM est aussi impliqué dans les études de définition des tolérances pour les nouveaux éléments, reliées à la stabilité à long terme du faisceau.

Valorisation des logiciels pour le transport de faisceau

Depuis le début des années 2000, cet ensemble de codes, dont l'activité de développement débuta en 1995, a été distribué dans de nombreux laboratoires et est utilisé pour la plupart des études d'accélérateurs à haute intensité de par le monde. De plus, la prédictibilité de ces codes a été vérifiée à l'aide de confrontations expérimentales à SNS aux USA, J-Parc au Japon et GSI en Allemagne. Cette suite de logiciels professionnels est maintenant diffusée sous licence CEA et un site internet pour le téléchargement et la promotion via les moteurs de recherche internet a été créé : <http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/index.php>

R&D sur les cavités supraconductrices à radiofréquence

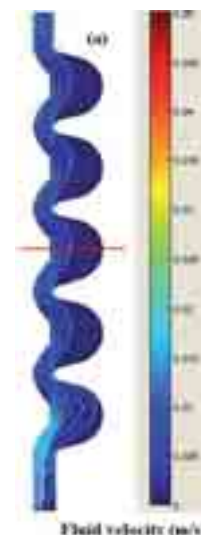
La supraconductivité est un phénomène lié à la surface extrême du matériau (les 50 premiers nm). Aujourd'hui le matériau utilisé pour la réalisation des cavités à radiofréquence (RF) est le niobium, seul supraconducteur à avoir de bonnes performances en RF. Il est important de pouvoir traiter la surface pour obtenir une très bonne qualité de surface. C'est l'objet de la R&D sur les traitements de surface, et en particulier le développement de l'électropolissage du niobium. Il faut également repérer l'emplacement des défauts qui font transiter la cavité de l'état supraconducteur à l'état normal à cause d'un échauffement localisé (phénomène de *quench*) afin de connaître l'origine des limitations. Pour cela on essaie de remplacer les mesures de températures complexes par une nouvelle méthode de détection d'onde thermique dans l'hélium superfluide. Enfin, car on arrive aux limites en champ magnétique que le niobium peut accepter, il faut prévoir les nouveaux supraconducteurs de demain. Il semblerait que pour les applications RF seuls des matériaux nanocomposites puissent accepter un champ plus élevé que le niobium. Parallèlement la conception de nouvelles cavités permet de produire des faisceaux adaptés aux nouveaux projets demandeurs de performances extrêmes. C'est le cas pour les nouvelles cavités du projet SPL (*Superconducting proton linac*) et du projet ESS (*European spallation source*).



Cavité pour l'ILC (*International linear collider*) installée sur le banc d'électropolissage vertical avant traitement.

en proposant des évolutions significatives – circulation d'acide, amélioration de la sécurité, automatisme – se traduisant par un procédé fiable et transposable à l'industrie. Ce procédé pourrait s'appliquer aussi bien au traitement de cavités développées pour l'ILC (*International linear collider*) qu'à l'électropolissage des cavités développées pour le SPL.

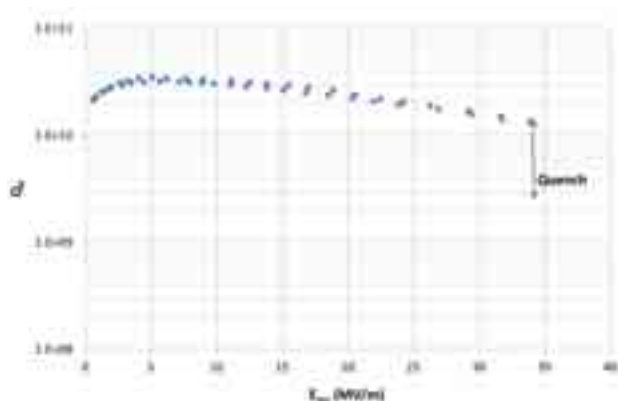
Le projet s'est déroulé en trois phases principales : expression des besoins, études de détail avec la réalisation de plans par la société Auxitec Ingénierie, et réalisation confiée à la société Corelec. La mise en place de cette infrastructure a été accompagnée d'une étude de modélisation avec le logiciel Comsol multiphysics (simulation de la dynamique des fluides et de la distribution du champ électrique dans la cavité) afin d'anticiper le comportement du traitement en fonction du type de cavité utilisé. Les travaux ont mis en évidence l'influence des dimensions de la cavité sur l'efficacité du procédé, nécessitant un design spécifique de la cathode dans chaque configuration.



Modélisation de la dynamique des fluides lors du traitement d'une cavité pour le SPL (*Superconducting proton linac*).

Polissage électrochimique

Les recherches concernant le polissage électrochimique (électropolissage) des cavités supraconductrices de niobium se sont poursuivies et concrétisées par le développement d'une station d'électropolissage où la cavité elliptique est placée en configuration verticale. Les bénéfices attendus sont une simplification du procédé (souhaitable pour les traitements de cavités à grande échelle), une amélioration de la sécurité, et une transposition au traitement de résonateurs de grande taille. Cette installation s'inspire des travaux réalisés par l'université de Cornell, mais apporte de nettes avancées



Facteur de qualité en fonction du champ accélérateur pour une cavité monocellulaire électropolie verticalement.

La réception de l'installation s'est déroulée fin 2011, et le traitement régulier de cavités de R&D (monocellules et nonacellules de fréquence 1300 MHz) en 2012 confirme la robustesse de l'installation. À ce jour, 20 traitements ont été réalisés pour une durée totale de fonctionnement supérieure à 60 heures. Ces traitements ont permis de valider la pertinence des travaux précédents sur l'électropolissage horizontal à bas potentiel d'électrolyse. Un bas potentiel couplé à un haut débit d'acide répond de manière favorable aux contraintes liées à la configuration verticale, à savoir une réduction du gradient de température le long de la cavité et une évacuation efficace des gaz résultant des réactions électrochimiques. Les premiers tests en radiofréquence de cavités monocellulaires en cryostat vertical ont permis d'atteindre des gradients compris entre 30 et 34 MV/m.

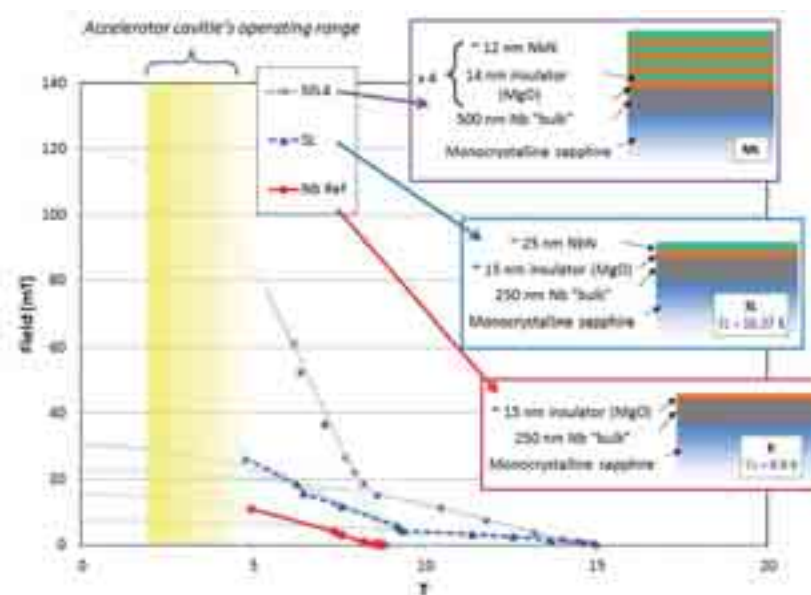
Localisation du quench par la méthode du second son

L'échauffement localisé dû au quench crée, dans l'hélium superfluide, une onde de chaleur de type second son. Cette onde est détectée par des capteurs OST (*oscillating superleak transducers*). En mesurant le temps de parcours de l'onde jusqu'aux différents capteurs, et en connaissant sa vitesse, on peut déterminer la distance du lieu du quench aux différents capteurs. On retrouve ensuite la position du quench par triangulation.

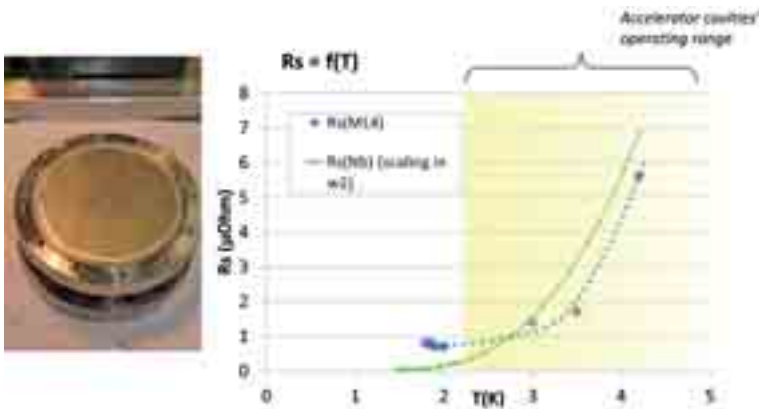
L'activité a été initiée à Saclay en 2010 par la réception de 8 capteurs de second son OST et le développement d'une carte électronique dédiée. Ces capteurs ont été testés plusieurs fois sur des monocellules, et associés à la localisation du quench par un bras de température. Le dispositif fonctionne convenablement et des premiers tests de localisation ont pu être effectués et comparés à la localisation par le bras de température. Il apparaît que la vitesse de l'onde de chaleur ne correspond pas tout à fait à la vitesse attendue pour une onde de 2^e son (écart jusqu'à + 50%). Des investigations doivent être menées pour mieux comprendre les phénomènes impliqués dans l'hélium superfluide, dans le but d'améliorer la fiabilité de la technique.

Supraconducteurs nanocomposites

Les cavités en niobium massif semblent avoir atteint aujourd'hui leurs limites en performance. On pense que les dissipations à haut champ qui mènent au quench sont liées à la pénétration de lignes de champ magnétique appelées vortex. En 2006 le théoricien A. Gurevich propose de blinder la surface avec des couches nanométriques dont l'épaisseur est inférieure à la profondeur de pénétration du champ dans le supraconducteur. Dans ce cas, le champ est atténué en traversant la couche mais aucun vortex ne peut apparaître. En empilant plusieurs de ces couches on peut atténuer suffisamment le champ qui parvient au niobium lorsqu'on augmente le champ accélérateur dans la cavité. De plus si l'on choisit un supraconducteur ayant une température de transition plus élevée, on diminuera les dissipations de surface.



1^{er} champ critique des différents échantillons. La couche de niobium seule mime le niobium massif. Nous avons ici testé 1 et 4 couches de 25 nm de NbN. On peut espérer améliorer ces résultats en augmentant le nombre et l'épaisseur des couches.



À gauche : couvercle en niobium recouvert de 4 couches de 25 nm de NbN. À droite résistance de surface à 3,88 GHz de cet échantillon comparé à une bonne cavité en niobium massif (avec une mise à l'échelle proportionnelle au carré de la fréquence).

En collaboration avec l'Inac (CEA Grenoble), nous avons déposé des composés modèles NbN (25nm) / MgO (14nm) /... sur des couches épaisses de niobium déposées sur du saphir monocristallin. Les techniques de pulvérisation cathodique utilisées ont été mises au point pour la réalisation de jonctions Josephson, mais la présence d'une couche diélectrique épaisse (MgO) est nécessaire pour découpler les différentes couches supraconductrices entre elles. Nous avons également déposé des couches similaires sur une plaque de niobium massif en vue de mesures en radiofréquence.

En collaboration avec l'Institut italien pour la physique nucléaire (INFN) nous avons effectué les premières mesures du champ de pénétration des vortex (1^{er} champ critique H_{C1}) à l'aide d'une mesure locale qui permet de s'affranchir des effets de bord usuels en magnétométrie classique. Ensuite nous avons développé au SACM un magnétomètre local permettant d'explorer une plus large gamme de champ et de température afin de se rapprocher des conditions d'utilisation des cavités. Les résultats en termes de champ critique sont très prometteurs : dès 6 K, on réussit à augmenter le champ critique H_{C1} d'environ 50 mT avec moins de 100 nm de NbN. On pourrait vraisemblablement atteindre une amélioration d'une centaine de mT vers 2 à 4 K, correspondant à 25 MV/m dans une cavité si on obtenait la même qualité de couches.

En collaboration avec l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO), nous avons également testé un échantillon de 4 couches de NbN déposées dans les mêmes conditions sur un couvercle de cavité en niobium massif. Grâce à une méthode thermométrique précise, on peut mesurer la résistance de surface de ces multicouches. Avec 4 couches de 25 nm, environ la moitié du courant d'écrantage circule dans le NbN et l'autre moitié dans le niobium. On voit que sur la partie à plus haute température (régime BCS) les couches présentent comme attendu des dissipations moindres que dans le niobium. À plus basse température, la résistance résiduelle est encore assez élevée, mais aucune optimisation n'a encore été effectuée sur ce type d'échantillon.

Ces structures multicouches semblent très prometteuses pour l'avenir de la technologie des cavités supraconductrices à radiofréquence. Du point de vue prospectif, cette R&D s'oriente vers deux voies : l'optimisation des structures (nombre et épaisseur des couches, type de supraconducteur) et le développement de techniques de dépôts adaptées aux cavités.

Structures accélératrices pour les accélérateurs de protons de haute intensité

L'expérience acquise dans le cadre du programme européen Hippie (*High intensity pulses proton injector*) sur la conception, le développement technologique et les tests des cavités supraconductrices, des coupleurs de puissance RF et des systèmes d'accord de fréquence, a permis au SACM de s'impliquer dans le développement de cavités multicellulaires pour les protons de haute énergie du projet SPL et, plus récemment, pour l'accélérateur supraconducteur de la source européenne de spallation ESS.



Demi-cellules d'une cavité de 704 MHz à $\beta = 1$ en cours de fabrication.

A large, complex superconducting magnet assembly is shown in a factory setting. The magnet is a large, circular structure with a central opening, surrounded by a dense network of red and blue cables and structural supports. The assembly is mounted on a blue crane or lift. The background shows a large industrial facility with various pipes, scaffolding, and equipment.

Électroaimants supraconducteurs

Le spectromètre supraconducteur Glad pour R³B

La collaboration européenne R³B (*Reactions with relativistic radioactive beams of exotic nuclei*), regroupant 63 instituts de 21 pays et 230 physiciens, met en place auprès du laboratoire GSI de Darmstadt en Allemagne un programme consacré à la physique émergente des noyaux exotiques aux énergies relativistes. Celui-ci nécessite la construction d'installations expérimentales aux performances accrues : réactions en cinématique inverse, détection intégrale des produits de réaction, et résolution en impulsion. Au sein de l'ensemble de détection R³B, le spectromètre supraconducteur de grande acceptance Glad (*GSI large acceptance dipole*) jouera un rôle central. L'avant-projet a été étudié dans le cadre du 5^e programme-cadre de recherche et développement européen (5^e PCRD). La décision de financer la construction de l'aimant Glad a été prise en octobre 2005, au titre du 6^e PCRD.



À gauche : la structure magnétique composée de 6 bobines trapézoïdales. Au milieu : la masse froide de l'aimant comprenant les quatre boîtes à bobines ainsi que les plaques de liaison et leurs supports cryogéniques. Les boîtiers de jonction électrique entre les câbles supraconducteurs sont visibles ici sur fond bleu. En jaune figure le réservoir de 460 l alimentant les tubes de refroidissement indirect à 4,5 K par circuit thermosiphon. À droite : le cryostat flanqué de son satellite cryogénique regroupant les connections externes ; il se déplacera sur coussins d'air. La masse totale de l'aimant est de 55 tonnes.

Spécifications du spectromètre

Analysant les particules issues des réactions entre le faisceau d'ions radioactifs et la cible secondaire, le dipôle Glad devra prendre en compte de nombreuses contraintes dont :

- ▶ une intégrale de champ de 4,8 tesla.mètres permettant de dévier de 18° les ions lourds de forte rigidité magnétique (typiquement 15 T.m pour ¹³²Sn⁵⁰⁺) et jusqu'à 50° les protons ;
- ▶ une grande ouverture angulaire, horizontale comme verticale (± 80 milliradians à l'entrée), assurant de plus la transparence aux neutrons non déviés par le champ magnétique ;
- ▶ une grande acceptance en impulsion permettant de détecter simultanément les protons, les neutrons et les noyaux lourds relativistes, à des énergies de l'ordre du giga-électronvolt (GeV) par nucléon ;
- ▶ un champ de fuite négligeable (< 20 mT), en particulier autour de la zone de la cible, située 1 m en amont de la face d'entrée de l'aimant ;
- ▶ une résolution de 10^{-3} en impulsion et de 1 mrad en angles reconstruits à la cible.

Réalisation et tests de l'aimant Glad

La construction de cet aimant est partiellement financée par le Contrat européen CNI Dirac (*Construction of new infrastructure – Darmstadt ion research and antiproton center*) du 6^e PCRD depuis fin 2005. La conception a abouti à un aimant au design compact et innovant utilisant une configuration magnétique en blindage actif.

À la suite des tests mécaniques réalisés sur des échantillons de conducteurs et sur la maquette à l'échelle $\frac{1}{2}$ du bobinage, la conception mécanique a pu être finalisée et la fabrication des bobines lancée en 2009. Suite à la réalisation d'une bobine prototype au cours de l'année 2009, la réalisation des six bobines définitives et leur intégration dans leur boîte en alliage d'aluminium se sont poursuivies durant l'année 2010. Par ailleurs, au cours de cette même année 2010, le test électrique à température cryogénique de la maquette a démontré les bonnes performances du conducteur et a confirmé le bon comportement thermomécanique du bobinage.

La première bobine livrée fin 2010 a permis de débiter le montage de la masse froide dans son ensemble. En dehors du montage mécanique proprement dit, un des



Intégration d'une bobine dans sa boîte.

travaux les plus importants a porté sur la réalisation des jonctions électriques reliant les 28 doubles galettes entre elles. La résistance de chaque jonction devant être de l'ordre de quelques nano-ohms, un outillage spécifique a été réalisé et une attention toute particulière a été

apportée à cette tâche. De nombreux contrôles d'isolement électrique ont été effectués sur ces jonctions afin de valider leur réalisation. Avant leur assemblage, chaque bobine a reçu, par collage et calage, ses échangeurs thermiques en aluminium.

La circulation naturelle d'hélium liquide dans les tubes des échangeurs permettra le refroidissement indirect de l'ensemble de la masse froide. Les boîtes à bobines sont reliées thermiquement aux bobinages par un ensemble de 344 tresses en cuivre qui assurent leur refroidissement.

Fin 2011, la masse froide assemblée a été posée sur ses trois pieds cryogéniques, dont deux sont articulés afin que la masse se rétreigne librement lors de la mise en froid. Celle-ci a ensuite été installée dans un des cryostats de test de la station W7-X qui permettra de vérifier son comportement dans toutes les phases de fonctionnement de l'aimant : mise en froid, montée du courant, *quench*, réchauffage. Pour assurer ces fonctions et accueillir la masse froide, la station W7-X a été modifiée



La moitié des jonctions stabilisées, brasées, isolées puis installées sur leur plaque de refroidissement.

au cours de l'année 2011 et de nombreux essais ont permis de confirmer que sa capacité cryogénique était compatible avec le fonctionnement de l'aimant.

L'année 2012 a permis de raccorder la masse froide à la station et d'effectuer toutes les vérifications indispensables au bon fonctionnement et à la sécurité de l'aimant lors des tests. Les premiers essais en courant ont été effectués fin 2012 et se poursuivront début 2013 pour atteindre le courant nominal de 3584 A.



Masse froide déposée dans un des cryostats de la station d'essai W7-X de Saclay pour son test de réception au courant nominal.

L'imageur à haut champ magnétique Iseult pour la plateforme Neurospin

La technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil de diagnostic et de recherche essentiel pour les neurosciences. Dans ce contexte, le centre Neurospin du CEA Saclay accueillera en 2013 un imageur par résonance magnétique de 11,75 teslas avec une ouverture de 90 cm de diamètre permettant le passage du corps entier d'un patient. L'apport de cet aimant à l'imagerie moléculaire, combiné à de nouveaux agents de contrastes pharmaceutiques, permettra de progresser dans la connaissance du cerveau en améliorant la résolution des images d'un facteur 10. Le développement d'Iseult s'intègre dans un projet franco-allemand en collaboration avec des industriels majeurs du secteur, Guerbet, Siemens Medical Solutions et Alstom.

Les défis de l'aimant Iseult

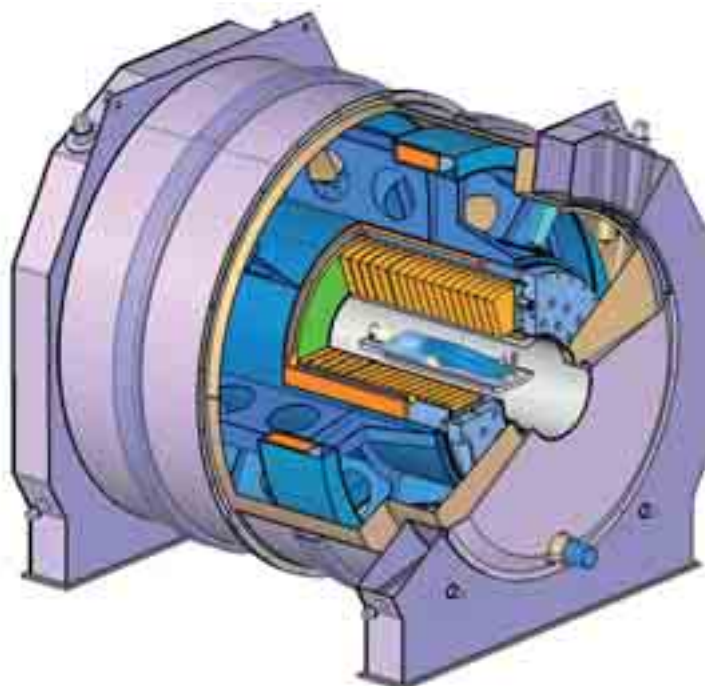
L'aimant Iseult comporte des caractéristiques qui le distinguent des aimants d'IRM conventionnels. Les difficultés de réalisation peuvent être déclinées selon cinq grands facteurs :

- ▶ une grande intensité de champ magnétique (11,75 T) ;
- ▶ un grand volume utile (quelques litres à comparer à l'autre système d'imagerie déjà installé dans les bâtiments de Neurospin produisant un champ de 17 T mais dans un volume cent fois plus petit) ;
- ▶ une stabilité temporelle (variation du champ magnétique inférieure à 10^{-9} T durant 10 min) ;
- ▶ une homogénéité du champ de $5 \cdot 10^{-7}$ T sur le volume d'étude que représente le cerveau du patient ;
- ▶ un confinement du champ magnétique dans la salle d'expérience.

Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils supraconducteurs en niobium-titane parcourus par un courant de 1483 A stable à 0,05 ppm/h et bobinés en doubles galettes. Ce supraconducteur est maintenu à une très basse température (1,8 K) à l'aide de 5000 litres d'hélium superfluide protégés de l'extérieur par une série d'enceintes isolantes. Pour apprendre à maîtriser ces difficultés, les solutions proposées ont réclamé un plan de développement adapté comprenant la réalisation de prototypes et de stations d'essais spécifiques.



Câble supraconducteur en goulotte pour la bobine principale (9,2 mm x 4,9 mm) comportant 10 brins de fil composite NbTi-Cu insérés dans une goulotte en cuivre puis enrobés de soudure.



Coupe de l'aimant Iseult de 11,7 T. En orange les bobinages supraconducteurs, en bleu l'enceinte à hélium et la structure mécanique à 1,8 K.

Fin des développements

De 2009 à début 2012, une série de prototypes spécialisés et des tests spécifiques sur des bobines modèles ont été réalisés pour démontrer les principes de montage et vérifier les capacités du conducteur à fonctionner aux contraintes nominales de champ magnétique et de forces. En particulier, un prototype appelé R1 a été réalisé à partir d'un assemblage de 6 doubles galettes. Chaque double galette est réalisée à partir de 11 tours du conducteur final et utilise les mêmes composants et procédures de fabrication que l'aimant final. Après leur bobinage, les 6 doubles galettes sont assemblées dans une structure mécanique réalisée à partir de brides en acier inoxydable, et un effort axial de 240 t est appliqué à l'aide de 12 tirants en aluminium. Le prototype R1 a ensuite été inséré dans l'aimant de 8 T de la station Seht de façon à produire un champ maximal de 12 T sur le conducteur.

La mise en froid et les tests du prototype R1 ont été entrepris avec succès fin 2011 et début 2012. En montant conjointement le courant dans Seht et R1, une contrainte azimutale de 225 MPa a été atteinte sur le conducteur, bien supérieure à la contrainte nominale de 170 MPa attendue sur Iseult. D'autres tests à 4,2 K ont permis de montrer que le conducteur pouvait atteindre, bien que soumis à cette contrainte mécanique extrême, 96 % du courant critique théorique, soit l'équivalent d'une différence de 0,1 K par rapport à la température critique théorique. Cette valeur est à comparer à la marge en température de 1 K qui a été l'hypothèse de dimensionnement de l'aimant Iseult. Conjugués à l'application d'une contrainte axiale de près de 110 MPa, les tests ont démontré la capacité du conducteur à tenir les contraintes mécaniques d'Iseult avec une marge de près de 20 %, dans des conditions de champ magnétique représentatives d'Iseult.

Ces bons résultats ont clôturé la phase finale de qualification des composants et des procédures de fabrication des bobines d'Iseult. Ils ont ouvert la voie au lancement en fabrication le 1^{er} février 2012 par Alstom des 170 doubles galettes de série.



Prototype R1 : empilement de 6 galettes prototypes, de rayon intérieur de 185 mm et de rayon extérieur de 240 mm, dans une structure mécanique pour étudier les caractéristiques mécaniques du conducteur Iseult sous un champ magnétique intense (12 T).

L'aimant de 11,7 T est en cours de fabrication

Les 190 km de conducteurs nécessaires aux bobinages ont été fabriqués aux États-Unis par la société Luvata Waterbury Inc. de 2010 à 2012. Les doubles galettes définitives sont en cours de réalisation chez Alstom à Belfort ; fin décembre 2012 plus de 125 unités ont été produites sur les 170 prévues. En parallèle, les bobines de blindage actif sont prêtes à être bobinées. Les autres composants de l'aimant ont été commandés et sont soit en cours de fabrication soit déjà livrés.

Le système cryogénique est conçu pour refroidir l'aimant 24 heures par jour et 365 jours par an. Il est déjà installé dans les sous-sols du bâtiment Neurospin. La pièce maîtresse du système est un réfrigérateur d'hélium fourni par Air Liquide à la fin de 2010. Les essais de réception ont démontré des performances meilleures que celles prévues.



Bobinage d'une double galette de série.

Le circuit d'alimentation électrique à courant continu comprend deux convertisseurs de puissance. Le premier permet la montée de l'aimant au courant nominal de 1483 A sous 40 V et le second alimente ensuite en permanence l'aimant à l'intensité nominale en mode stabilisé. Ces deux alimentations seront livrées à Neurospin au milieu de l'année 2013.

Le réseau d'antennes à radiofréquence

La formation d'une image en résonance magnétique s'obtient par le traitement du signal de relaxation d'un noyau atomique, généralement celui de l'hydrogène, préalablement excité. Une antenne est utilisée à la fois pour exciter les noyaux grâce à une onde électromagnétique et pour recueillir le signal de relaxation. Elle opère à une fréquence qui augmente proportionnellement avec le champ magnétique statique : 128 MHz à 3 T et 500 MHz à 11,7 T. Jusqu'à 128 MHz, une antenne à accès unique assure cette fonction en garantissant une excitation suffisamment uniforme. Au-delà, l'interaction entre l'onde émise et la matière organique rend l'excitation fortement inhomogène et requiert la mise au point d'une antenne réseau à accès multiple.



Antennes à 7 T développées par le SACM. De gauche à droite : antenne à 8 voies, à 12 voies et son interface SVD (singular value decomposition).

Une première antenne réseau à 7 T composée de 8 voies a été construite par le SACM. Elle a permis au centre Neurospin de mettre au point sur un fantôme, c'est-à-dire un objet ayant des propriétés diélectriques similaires à celle d'une tête, toute la méthodologie relative à la transmission parallèle mise en œuvre pour retrouver une excitation homogène. Avec la transmission parallèle, on cherche à réaliser une excitation uniforme de deux manières. La première méthode consiste à ajuster l'amplitude et la phase du signal qui alimente chaque élément d'une antenne réseau en conservant une même forme temporelle pour toutes les impulsions afin de générer par superposition un champ magnétique radiofréquence uniforme dans la région d'intérêt. Malheureusement, cette méthode s'avère inefficace pour couvrir un cerveau entier. Pour aller plus loin, le temps est mis à profit comme degré de liberté supplémentaire pour optimiser des formes d'impulsions différentes sur chaque canal transmises de manière simultanée avec des gradients de champ magnétique. Au cours de l'excitation, ces derniers permettent de se déplacer dans l'espace de Fourier dual à l'espace de l'image, afin de couvrir différentes fréquences spatiales et pallier ainsi les interférences destructives qui sont à l'origine des artefacts. Avec cette seconde méthode, c'est l'angle de bascule qui est rendu homogène.

Pour obtenir les premières images de cerveau humain à 7 T en 2010, l'antenne à 8 voies a été certifiée par le Bureau Veritas selon la norme IEC 60601-1 relative aux appareils électromédicaux, et l'expérience a été conduite avec l'autorisation de l'agence française de sécurité sanitaire et des produits de la santé (AFSSAPS),

devenue aujourd'hui l'agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), dans le cadre d'un protocole intitulé « Évaluation de l'apport de l'imagerie et de la spectroscopie par résonance magnétique à 7 teslas pour l'étude de la structure et du fonctionnement cérébral », qui avait aussi reçu l'aval du CPP (Comité pour la protection des personnes). Pour améliorer d'un facteur 2 la sensibilité de l'antenne en réception, une antenne à 12 voies a été construite et se trouve aujourd'hui en phase de test. Une interface brevetée de répartition des signaux permet de piloter cette antenne avec uniquement 8 émetteurs. Le gain de sensibilité mesuré promet une augmentation significative de la résolution des images par rapport à un scanner à 3 T. L'antenne pour le projet Iseult à 11,7 T est déjà construite selon le même schéma. Elle sera réglée et testée sur site après l'arrivée de l'aimant.

Le futur

Le montage de l'aimant sera effectué dans les locaux d'Alstom après la livraison des composants du cryostat. La livraison de l'aimant à Saclay est prévue fin 2013. L'aimant, une fois livré à Neurospin, sera connecté au système cryogénique et aux équipements électriques afin que les essais de qualification complets à 1,8 K et la montée au champ magnétique nominal puissent être effectués. Les premières images, obtenues à l'aide de l'antenne radiofréquence à 11,7 T développée au SACM, devraient être disponibles courant 2014.

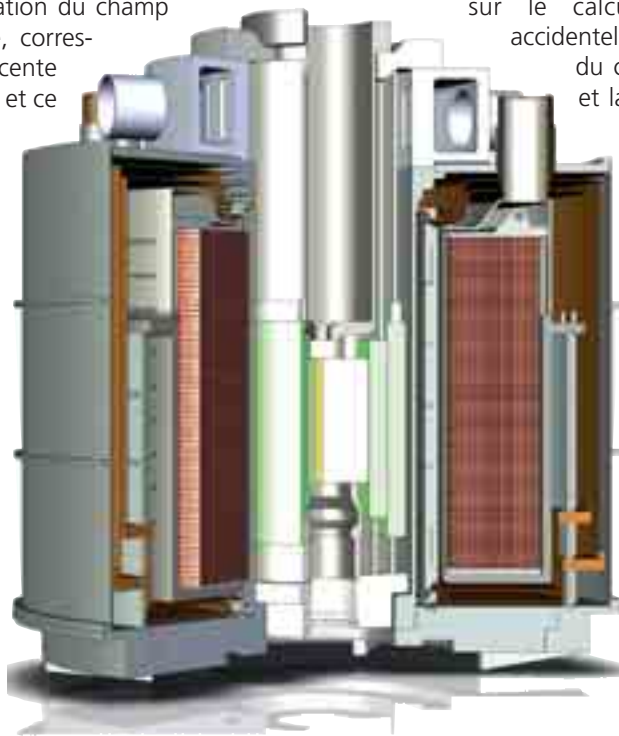


Exemple d'images sans artefact, ni perte de contraste, obtenues à 7 T avec la transmission parallèle et l'antenne à 8 voies.

La bobine supraconductrice pour l'aimant hybride du LNCMI

Le Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI) de Grenoble construit un aimant hybride capable de générer 43 teslas dans un diamètre de 34 mm par la combinaison d'aimants résistifs et d'un aimant supraconducteur. Suite aux pré-études de faisabilité, le CNRS et le CEA ont signé, fin 2010, un accord de collaboration qui confie au SACM les études et le suivi de réalisation de l'électroaimant supraconducteur de 8,5 teslas. L'aimant hybride comportera également un assemblage concentrique d'aimants résistifs qui produiront 34,5 teslas (bobines de Bitter et bobines polyhélices).

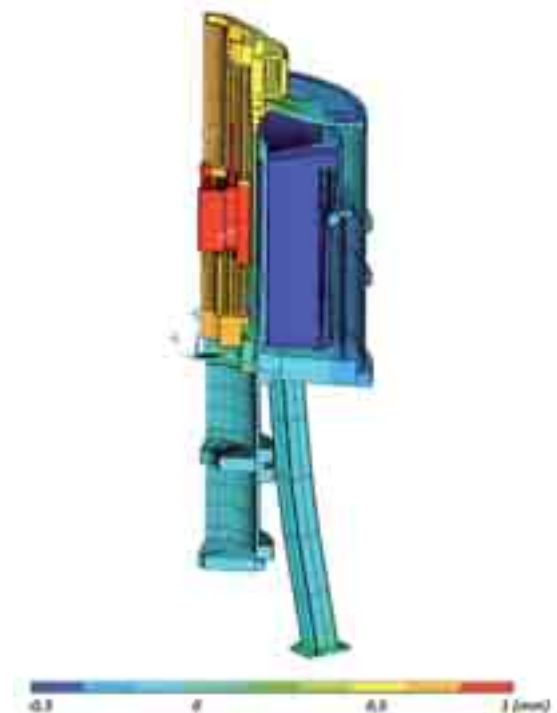
L'aimant supraconducteur solénoïdal est conçu pour ne pas transiter lors d'une variation du champ central de 1 tesla par seconde, correspondant à la montée et à la descente du courant des aimants résistifs, et ce grâce à un canal d'hélium superfluide interne au conducteur. Ce solénoïde d'un mètre de diamètre intérieur devra résister à des niveaux de contraintes mécaniques et électriques très élevés en cas de perte accidentelle du champ magnétique des aimants centraux résistifs. L'aimant supportera alors temporairement une impulsion mécanique équivalente à 3 fois sa masse (soit 75 tonnes) et l'écran des courants de Foucault supportera 100 fois sa masse (soit 370 tonnes). Ces efforts mécaniques et les tensions induites dues aux courants de Foucault ne permettront pas d'éviter la transition du supraconducteur dans ce cas accidentel extrême et peu probable. Nous avons calculé les composants de sorte à éviter la casse irréversible du cryostat et à assurer la tenue mécanique de l'aimant supraconducteur.



Les études réalisées sur la période 2011-2012 ont porté sur le calcul des régimes transitoires accidentels, la conception du bobinage et du cryostat ainsi que la conception et la mise au point de systèmes de supports cryomécaniques. Ces supports sont très élaborés et suffisamment robustes pour encaisser les chocs transitoires tout en gardant un niveau d'apport de chaleur permanent acceptable (0,3 W) pour maintenir l'aimant à 1,8 K. Leur conception très innovante en termes de formes et de qualité d'isolation par rapport à leur tenue mécanique font l'objet d'un dépôt de brevet en cours.

*Coupe de l'aimant hybride pour le LNCMI.
En vert : les aimants résistifs.
En marron : l'aimant supraconducteur qui sera bobiné en doubles galettes.*

Analyse mécanique vibratoire de la structure de l'aimant hybride (en bleu : le solénoïde supraconducteur ; en rouge : les aimants résistifs). Déplacements verticaux amplifiés par 200 à l'instant $t = 7$ ms après l'incident. Calculs effectués sur un quart de structure sous le code Ansys d'après un modèle initialement étudié par le LNCMI en 2004 puis adapté et réécrit pour la configuration de l'aimant actuel par le SIS en 2012. Bien que les éléments soient tous très solidement maintenus dans la structure, les calculs prédisent des déplacements dus aux déformations structurelles de l'ordre du millimètre.



Tests des aimants supraconducteurs de l'expérience Katrin

L'expérience Katrin (*Karlsruhe tritium neutrino*) est une expérience visant à mesurer la masse du neutrino avec une précision du sub-eV en examinant le spectre des électrons émis par la radioactivité β du tritium. La source de tritium comprend un ensemble de solénoïdes supraconducteurs M_1 - M_2 - M_3 destinés à guider les électrons vers le spectromètre. Ces aimants supraconducteurs seront alimentés en série dans l'expérience finale. Ils ont été fabriqués et testés individuellement par la société Bruker. Leur protection initiale était passive et basée sur des diodes froides ; ce principe a montré ses limites notamment pour des *quenches* à faible courant lors desquels les aimants n'ont pas été correctement protégés. Un nouveau système de protection active, comprenant une résistance de décharge externe et un système de détection a été mis conjointement au point par l'Irfu et le Kit (*Karlsruhe institut für technologie*).

La station verticale du bâtiment 198 du CEA Saclay, équipée d'un cryostat d'une profondeur de 8 m, a permis de tester les aimants par doublets dans un bain d'hélium liquide à 4,2 K. Afin de diminuer la quantité d'hélium nécessaire au refroidissement, de la mousse en polystyrène a été placée tout le long des cryostats des aimants. Le circuit électrique, contacteurs et résistance de décharge, le système de détection et d'acquisition sont issus des éléments modifiés de la station d'essais Seht.

Les tests en froid des aimants dans le cryostat vertical ont permis de vérifier le bon fonctionnement du système de détection et de protection. Les aimants ont d'abord été testés à leur courant nominal (314 A), individuellement et en doublet. Cela a permis de valider le fonctionnement en série, notamment en regard des forces magnétiques importantes engendrées entre aimants, à savoir 20 tonnes.



Quench provoqué, avec échappement d'hélium.



Mise en place d'un doublet d'aimants dans le cryostat de la station d'essai verticale.

Des *quenches* ont ensuite été provoqués grâce à des chaufferettes placés sur les solénoïdes. Les seuils de détection - tension et durée - ont été ajustés afin d'éviter toute détection intempestive qui ne serait pas due à une véritable transition. Les résultats des tests sont en parfait accord avec les simulations effectuées ; ils démontrent que les aimants sont correctement protégés dans leur configuration en série grâce au nouveau système de protection.

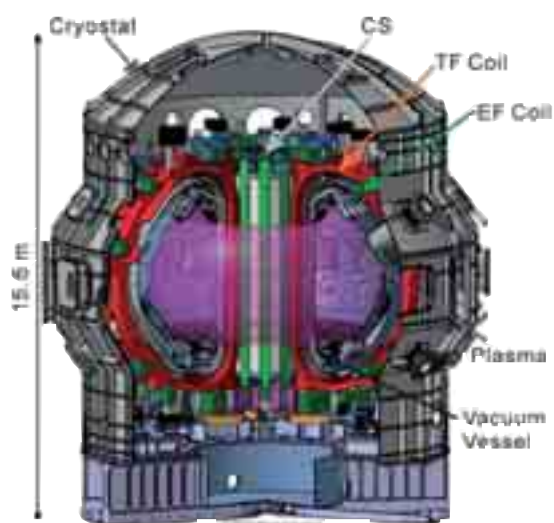
Moins d'un an a été nécessaire entre la signature de l'accord de collaboration et la soumission du rapport final des tests au Kit.

A large, complex cryogenic system, likely a cryostat or a similar low-temperature apparatus. The central component is a large, cylindrical stainless steel chamber with a flange top. It is surrounded by a network of stainless steel pipes and fittings. Several vertical pipes extend downwards from the chamber, some with flanges and others with various connectors. The system is mounted on a metal base. The background shows a laboratory setting with a white wall and a window.

Cryogénie

Station d'essais des bobines toroïdales du tokamak JT-60SA

Dans le cadre de l'accord entre l'Europe (F4E, *Fusion for energy*) et le Japon (JAEA, *Japon atomic energy agency*) sur l'approche élargie pour la fusion contrôlée par confinement magnétique, l'Europe a en charge la rénovation complète du tokamak JT-60 situé à Naka au Japon, en particulier l'étude, la réalisation et les tests de 18 nouveaux aimants supraconducteurs toroïdaux utilisés pour le confinement magnétique du plasma. Le SACM a en charge la réalisation de la station de tests à froid de ces 18 aimants supraconducteurs. Le test du 1^{er} aimant est prévu en mai 2014.



Vue éclatée du système magnétique du tokamak JT-60SA.
En rouge, les bobines toroïdales.

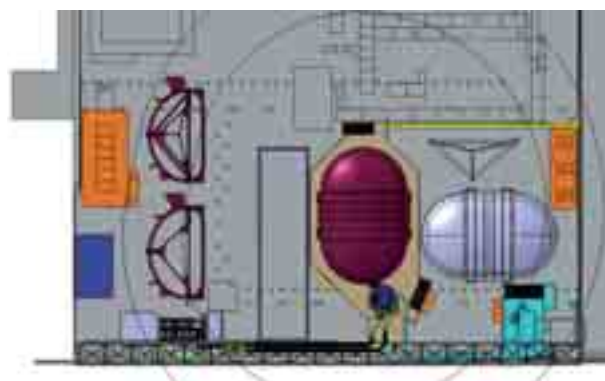
La fabrication de 9 bobines toroïdales est sous la responsabilité de la France via le CEA ; les 9 autres sont sous la responsabilité de l'Italie via l'agence nationale italienne pour l'efficacité énergétique, l'ENEA. Les Instituts du CEA concernés par les tests des bobines sont l'Institut de nanosciences et de cryogénie (Inac) de Grenoble, l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (IRFM) de Cadarache et l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) de Saclay.

Le projet se décline en deux phases principales :

- ▀ la phase de développement qui consiste en l'étude, la réalisation et la validation de la station d'essais au moyen d'un aimant prototype de démonstration ;
- ▀ la phase d'exploitation qui consiste en la réalisation des tests de validation des 18 aimants toroïdaux.

Les essais cryogéniques des premières bobines de chaque constructeur (2 constructeurs de 9 bobines chacun) seront identiques aux tests de série à l'exception près qu'ils incluront un *quench* provoqué par une augmentation de la température de fonctionnement. Ces deux premiers tests seront importants pour :

- ▀ vérifier que les deux bobines répondent aux spécifications techniques, étudier leur comportement dans les conditions nominales de test, contrôler leur marge de température qui définira la marge de température des bobines de série ;
- ▀ contrôler le bon fonctionnement des mesures de potentiel des bobines et acquérir des informations pour le fonctionnement de la future machine.



Description globale de la station de tests. À gauche : les baies d'instrumentation en orange, la salle de contrôle en bleu, l'alimentation électrique de 26 000 A en gris et les supports des bobines pour les tests cryogéniques en violet. À droite : le cryostat en violet avec sa boîte à vannes en bleu et le réfrigérateur d'hélium en cyan.

Un cryostat de 7 m par 10 m pourra accueillir et tester un aimant à la fois. L'implantation de la station d'essais permet la préparation, en parallèle, d'autres aimants. Les aimants seront testés à des débits d'hélium de 2 g/s par conducteur, à une pression d'entrée de 5 bar et à un courant nominal de 25,7 kA. La température des tests sera incrémentée jusqu'à être à la limite des conditions de *quench* (de 5 K à 7,5K).



L'équipe de la station de tests à froid devant le cryostat.

Les grands systèmes de refroidissement

La mise en œuvre des grands aimants supraconducteurs, chez le client comme Iseult dans le Laboratoire Neurospin ou sur des stations d'essais comme JT-60SA au bâtiment 126 du CEA Saclay, et des structures accélératrices à cavités supraconductrices, sur des stations d'essais comme Supratech ou sur l'accélérateur prototype Ifmif-Lipac (*Linear Ifmif prototype accelerator*) à Rokkasho au Japon, nécessite l'installation de systèmes cryogéniques permettant d'absorber les puissances développées aux basses températures dans ces équipements (pertes statiques des cryostats et pertes dynamiques en radiofréquence ou sous champ magnétique variable). Ces systèmes s'appuient sur des réfrigérateurs industriels d'hélium (jusqu'alors essentiellement fournis par l'Air Liquide) qui sont adaptés et insérés dans une architecture de cryodistribution répondant aux besoins spécifiques de chaque projet (température, débit, pression, puissance à extraire...).

Après l'étude et la mise en œuvre de la cryogénie des 2 cryomodules accélérateurs de l'anneau Soleil fonctionnant en hélium liquide saturé à 4,45 K, il y a quelques années, les derniers systèmes de réfrigération de ce type qui ont été étudiés et ont été installés ou vont l'être prochainement sont :

- ▀ les équipements nécessaires à la cryogénie en hélium superfluide pressurisé à 1,8 K de l'aimant Iseult dans les locaux et les sous-sols du laboratoire Neurospin ;
- ▀ l'usine cryogénique de l'accélérateur linéaire prototype Ifmif-Lipac associée au cryomodule à 8 cavités supraconductrices à radiofréquence travaillant à 4,45 K ; le SACM est en charge de l'étude, de la fourniture et du suivi de son installation au Japon.



Photo du réfrigérateur Air Liquide installé dans les sous-sols de Neurospin avec en arrière-plan le stockage de 5000 litres d'hélium liquide.

Dans ces 2 projets, il s'est agi d'adapter au mode opératoire de la machine (aimant et accélérateur) les stockages de gaz et de liquide, les tableaux de vannes gérant les retours de fluide à température ambiante, les boîtes à vannes ou satellite cryogénique, les systèmes de pompage d'hélium et les lignes de transfert permettant une mise en froid et une alimentation continue et fiable en hélium des éléments supraconducteurs. Les réfrigérateurs retenus pour ces 2 applications développent respectivement des puissances équivalentes de 200 W et de 300 W à 4,4 K pour Iseult (déjà installé) et pour Ifmif-Lipac (en appel d'offres).

Dans le projet Iseult, seul le réfrigérateur et les compresseurs de cycle (145 kW installés) ont été demandés au fournisseur industriel (Air Liquide Advanced Technologies). Tous les autres équipements ont été étudiés puis lancés en fabrication par le SACM. Dans le projet Ifmif, très éloigné de nos bases, l'industriel qui fournira le réfrigérateur (AL-AT ou Linde Kryotechnik) aura aussi à réaliser et à installer les autres équipements de la centrale cryogénique (175 kW installés) sur la base d'une conception et d'un cahier des charges étudiés à Saclay.

Dans ces divers projets, nous bénéficions de l'important retour d'expérience et du savoir-faire des équipes travaillant sur nos stations d'essais utilisant de tels systèmes de réfrigération ou de liquéfaction (4 machines en service actuellement au SACM).

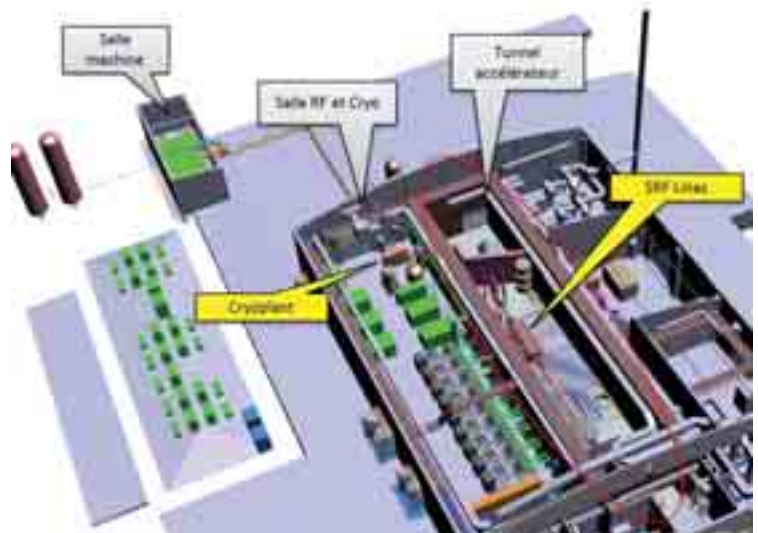
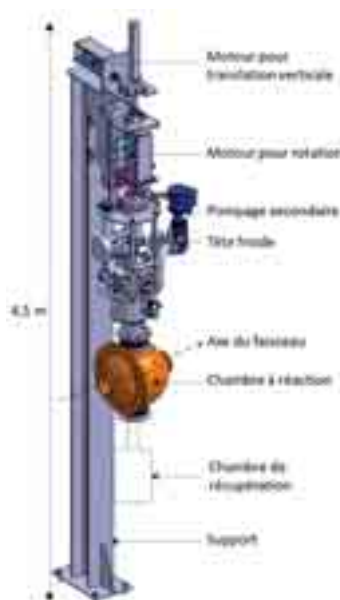


Schéma de l'usine cryogénique implantée dans le bâtiment d'Ifmif-Lipac au Japon.

La cible d'hydrogène solide Chymène pour Spiral2

Dans le cadre du projet Spiral2, le SACM a en charge la réalisation d'un système cryogénique permettant l'obtention d'une cible solide mince d'hydrogène pur sans conteneur adaptée aux expériences utilisant des faisceaux d'ions lourds de basse énergie. Elle sera installée au Ganil en 2016 pour le programme de recherche du Service de physique nucléaire dans le domaine des noyaux exotiques.

La cible se présente sous la forme d'un ruban d'hydrogène quasi solide (10 mm de large, 50 μm d'épaisseur) qui s'écoule en continu par une technique d'extrusion dans une chambre à réaction sous vide devant le faisceau d'ions. Le développement de cette cible se fait en collaboration avec le laboratoire Pelin fournisseur de l'extrudeuse, l'IPN d'Orsay en charge de la buse d'extrusion et l'Irfu pour la conception globale du système mécanique et cryogénique. Cet ensemble est constitué d'un cryostat sous vide permettant une translation verticale de 100 mm et une rotation de la cible de 100° afin de dégager des angles d'analyses à 90° par rapport au faisceau. Le cryostat est équipé d'une tête froide fournissant la puissance nécessaire (15 W à 11 K) pour la solidification de l'hydrogène dans la partie basse de l'extrudeuse. La puissance cryogé-



rique est transmise de la source à l'extrudeuse uniquement par conduction à travers des métaux à très forte conductivité thermique ($10000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 11 K). Dans le cryostat, l'hydrogène gazeux à la pression initiale de 8 bar est d'abord liquéfié en partie haute, puis il est partiellement solidifié et comprimé jusqu'à 100 bar dans l'extrudeuse refroidie avant l'expulsion du film solide à travers la buse dans le centre de la chambre à réaction. La pâte obtenue tombe ensuite par gravité dans une chambre de récupération où elle se sublime. Puis, le gaz est pompé et évacué dans une ligne dédiée. Un système de contrôle-commande pilote l'ensemble des équipements, gère la régulation thermique et la mise en sécurité du cryostat.

La cible d'hydrogène liquide pour le projet Minos

Le projet Minos (*Magic numbers off stability*) vise à effectuer la spectroscopie de noyaux exotiques produits par fragmentation auprès de machines d'ions radioactifs de nouvelle génération. La cible d'hydrogène sera installée sur les aires expérimentales du laboratoire japonais de Riken en 2013 et du laboratoire allemand GSI/Fair en 2017. Le SACM a en charge la réalisation d'un système cryogénique permettant l'obtention d'hydrogène liquide contenu dans une enveloppe en Mylar®.

Le Mylar (polymère thermoplastique) de 120 μm d'épaisseur permet de réaliser un volume étanche ayant une géométrie en forme de doigt de gant (150 mm de long et 52 mm de diamètre) afin d'optimiser les angles d'analyse. La cible est obtenue par l'assemblage de deux parties collées (fenêtre d'entrée et enveloppe de sortie) sur un support en inox. La tenue en pression de cet ensemble est de 6 bar. Le cryostat est équipé d'un cryogénérateur permettant la liquéfaction à 20,4 K de l'hydrogène gazeux dans le condenseur associé au deuxième étage de la tête froide (15 W à 20 K). L'hydrogène liquide obtenu tombe par gravité dans la cible. Les vapeurs froides produites retournent dans le condenseur via un circuit fermé. Le cryostat est équipé d'une vanne froide installée sur



le circuit de retour du gaz permettant de vider en quelques minutes la cible. La surpression créée dans la cible refoule le liquide dans le condenseur et ne laisse que des vapeurs froides. Après l'ouverture de la vanne, le liquide remplit la cible rapidement. Cette opération de cible à vide permet de mesurer le rapport signal sur bruit créé par l'enveloppe en Mylar. La géométrie du cryostat est conçue pour intégrer la cible au centre d'une détection de type TPC (chambre à échantillonnage temporel) en tenant compte des contraintes d'extraction de la cible sans démontage de la détection. Cet équipement est piloté par un système de contrôle-commande gérant les différentes phases de fonctionnement et la mise en sécurité du système.



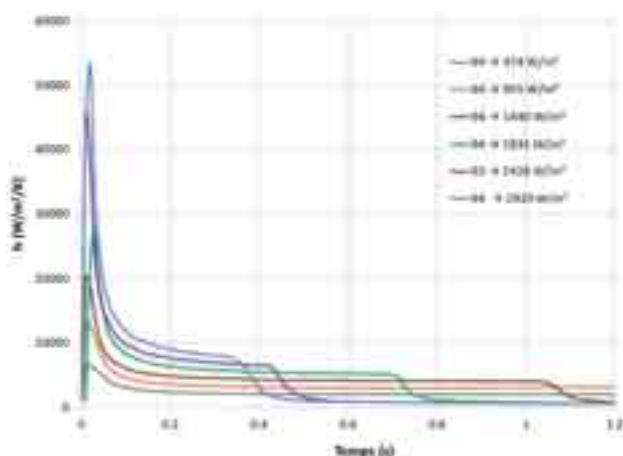
Développements
pour les aimants
supraconducteurs
du futur

R et D sur le refroidissement des aimants supraconducteurs

Afin d'optimiser les performances des systèmes cryomagnétiques, une R&D sur le refroidissement de ces systèmes est activement soutenue au CEA. Différents thèmes de recherche correspondant aux différents types d'aimants supraconducteurs sont menés de front. Des études sur les écoulements diphasiques d'hélium en régime transitoire sont conduites afin de prévoir les phénomènes thermohydrauliques survenant lors de quench d'aimants supraconducteurs refroidis par des écoulements externes fonctionnant, par exemple, en thermosiphon. Pour de plus petits systèmes, nous étudions le couplage entre des boucles de circulation et des cryogénérateurs afin de créer des systèmes autonomes de refroidissement. Enfin, des études sont aussi menées pour comprendre les transferts de chaleur en hélium superfluide à travers des microcanaux représentant les chemins thermiques typiques dans les isolations électriques des aimants d'accélérateur.

Écoulement diphasique d'hélium en régime transitoire

Certains systèmes de refroidissement des aimants de détecteurs pour la physique des hautes énergies sont basés sur des boucles de circulation d'hélium diphasique. Des études expérimentales sont menées afin d'étudier le cas particulier des régimes transitoires de refroidissement de ces grands aimants. Elles sont cruciales puisqu'elles couvrent le scénario où les aimants passent de l'état supraconducteur à l'état normal en dissipant une importante quantité de chaleur. Les résultats expérimentaux montrent que les transferts de chaleur sont améliorés dans les premiers instants (pendant environ 100 ms) après qu'une puissance est dissipée. L'augmentation du coefficient d'échange thermique en paroi est attribuée à une augmentation brutale de l'ébullition nucléée qui accroît les transferts de chaleur. Après le régime transitoire, le coefficient d'échange chute grandement pour les densités de flux de chaleur élevées entraînant l'apparition de l'ébullition en film qui est catastrophique pour le refroidissement. La connaissance de ces phénomènes ainsi que leurs constantes de temps permettra d'optimiser le refroidissement de ces grands aimants.



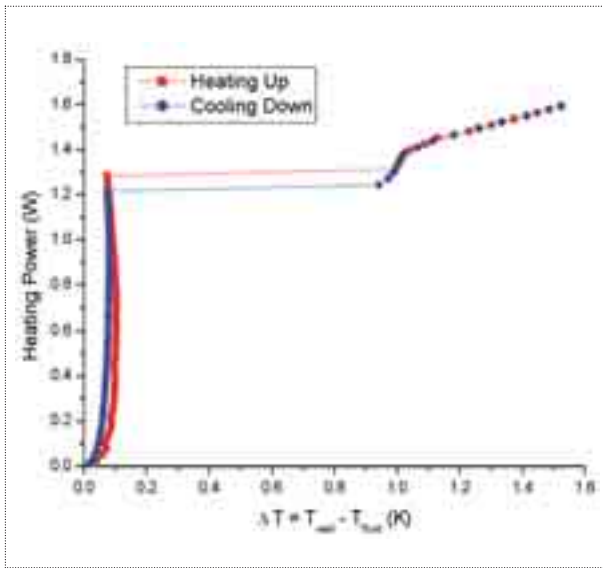
Évolution du coefficient d'échange pariétal lors d'une augmentation brutale de la densité de flux de chaleur d'une valeur initiale de 94 W/m² jusqu'à 2920 W/m².

Refroidissement par boucle de circulation diphasique autonome

L'idée de coupler une boucle de circulation naturelle (thermosiphon) avec un cryogénérateur présente plusieurs avantages pour le refroidissement de systèmes cryomagnétiques de taille et de puissance moyennes fonctionnant à basse température (10 W à 4,2 K) ou aux températures de l'azote liquide (100 W à 77 K). Ce couplage combine les avantages d'une boucle de circulation et de la recondensation des vapeurs synonyme d'un gain énergétique important (pas de transport et pas de perte du fluide cryogénique) et rend, en plus, ce mode de refroidissement autonome. On voit l'intérêt d'un tel système placé, par exemple, au fond d'une caverne expérimentale, et surtout pour des applications utilisant les supraconducteurs à haute température critique comme les câbles de puissance ou les électroaimants de nouvelles générations.



Boucle thermosiphon autonome composée d'un cryogénérateur (en haut), d'un condensateur (pot en acier inox) et de l'échangeur de chaleur (tube en cuivre vertical de 4 mm de diamètre équipé d'un fil chauffant).



Courbe d'ébullition de l'hélium à flux croissant (courbe rouge) et décroissant (courbe bleue). Les derniers points de mesure (puissance supérieure à 1,4 W) ont été obtenus à une pression supérieure à la pression critique de l'hélium ($p_c \approx 2,3$ bar).

Une boucle expérimentale autonome, à la température de l'hélium, a été conçue et instrumentée de façon à étudier ses capacités de refroidissement. Lorsque la puissance dissipée dans le tube échangeur croît, on retrouve les différents régimes thermiques rencontrés en écoulement diphasique : un régime de convection naturelle, un régime d'ébullition nucléée, un régime d'ébullition en film (après un saut de température d'environ 1 K) puis un régime d'écoulement monophasique supercritique pour les forts flux de chaleur. L'apparition de ce dernier régime n'est pas surprenante car le système fonctionne en boucle fermée et non à pression constante. La capacité de refroidissement d'un tel système est assez grande puisque les coefficients de transferts de chaleur varient de 1 à 10 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

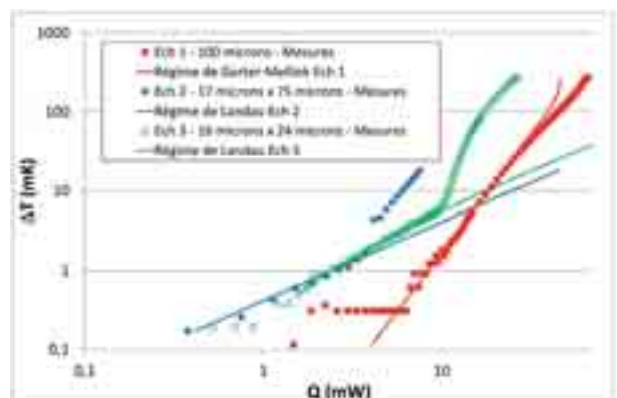
Transferts de chaleur en hélium superfluide à travers des microcanaux

Pour les aimants supraconducteurs d'accélérateur refroidis par de l'hélium superfluide ($T < 2,2$ K), les isolations électriques des conducteurs constituent la plus grande barrière thermique au refroidissement. Les isolations de aimants en NbTi peuvent être composées d'un enrubannage de rubans isolants en polymère créant des micro-canaux ayant des dimensions caractéristiques de l'ordre de 10 à 100 μm . La compréhension des phénomènes thermiques dans l'hélium superfluide à ce niveau de confinement est nécessaire pour l'optimisation du refroidissement de ces aimants. Afin d'étudier ces transferts thermiques, des microcanaux ont été creusés

chimiquement dans des substrats de Pyrex. Une différence de température, mesurée avec des capteurs miniatures, est créée entre un réservoir d'hélium superfluide et la sortie des canaux à l'aide d'un chauffeur. Ces mesures sont comparées aux modèles de transfert de chaleur connus dans l'hélium superfluide. On retrouve le régime de Gorter-Mellink pour des canaux de grandes dimensions (100 μm de diamètre équivalent) et le régime de Landau pour des dimensions plus petites (17 μm x 75 μm et 16 μm x 24 μm). Les prochaines études se focaliseront sur des dimensions proches du micron.



Microcanaux (2 mm x 10 μm) creusés dans un substrat de Pyrex. En bas : réservoir d'hélium équipé d'un chauffeur (fil en tire-bouchon) et de capteurs de température miniatures. En haut (couleur verte) : sortie des canaux dans le bain d'hélium superfluide.



Écarts de température dans des canaux de différentes dimensions. La température du bain d'hélium est de 1,9 K.

Développements pour les futurs aimants supraconducteurs du LHC

Le *Large Hadron Collider* (LHC) atteindra son énergie nominale de 14 TeV d'ici la fin 2014, puis sa luminosité nominale de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ en 2015. À partir de 2020, afin que son exploitation reste rentable, le LHC nécessitera une amélioration majeure visant à une augmentation significative de sa luminosité. La configuration de la nouvelle machine, appelée *High Luminosity LHC* (HL-LHC), imposera entre autres le remplacement des triplets de quadripôles des zones d'interaction et des triplets des zones d'insertion. En parallèle aux études pour le HL-LHC, un deuxième programme, appelé *High Energy LHC* (HE-LHC), explore la possibilité de réaliser une amélioration ultérieure permettant d'atteindre des énergies de collision dans la gamme des 26 à 33 TeV. L'idée de base est de remplacer tous les aimants de la machine actuelle par des aimants à champ plus élevé, de l'ordre de 20 T. Les seuls matériaux supraconducteurs permettant d'atteindre cet objectif très ambitieux sont le Nb_3Sn et les supraconducteurs à haute température critique.



Réalisation d'une couche de bobinage.

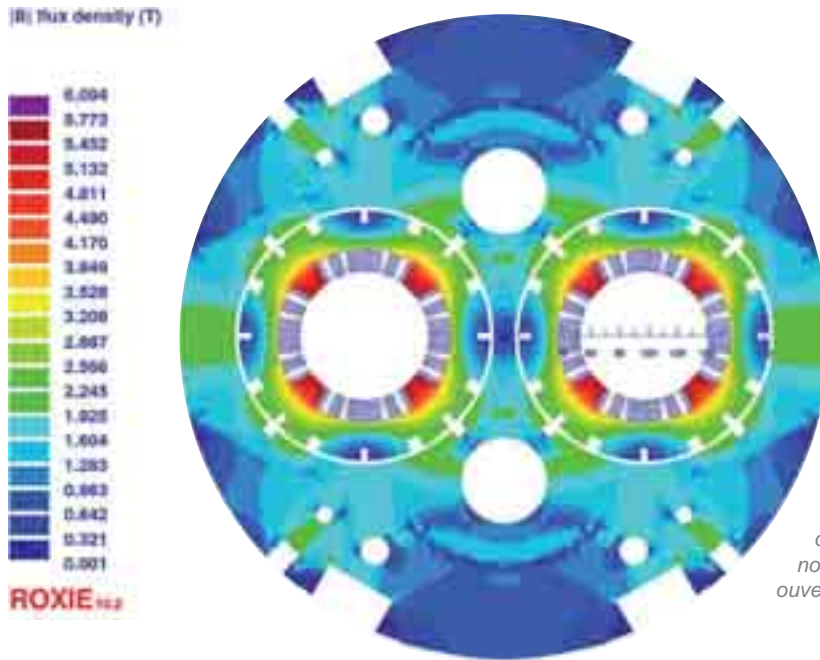
En collaboration avec le Cern, le Ciemat et le RAL (*Rutherford Appleton Laboratory*), le SACM a été chargé de la validation mécanique de la conception des quadripôles et de la réalisation de quatre bobines pour l'un des modèles de quadripôle. Chaque bobine est constituée de deux couches de bobinage, réalisées séparément et assemblées après polymérisation par une jonction interne. Les câbles utilisés sont les mêmes que ceux des dipôles des arcs du LHC mais une nouvelle isolation plus perméable à l'hélium superfluide a été développée afin de compenser les dépôts de chaleur plus élevés. Les bobines ont été livrées au Cern en août 2011. Leur assemblage et leur frettage ont été réalisés au Cern et les tests des modèles sont en cours.

Triplets de quadripôles en NbTi

L'augmentation d'un facteur 2 à 3 de la luminosité des zones d'interaction peut être obtenue par le remplacement des triplets de quadripôles de focalisation finale des zones d'interaction par des quadripôles à grande ouverture (120 mm contre 70 mm pour les triplets actuels), avec un champ maximum sur le conducteur du même ordre de grandeur que celui des quadripôles des arcs du LHC, à savoir environ 7 T, permettant donc l'utilisation du NbTi. L'énergie stockée et les efforts électromagnétiques mis en jeu sont en revanche beaucoup plus importants du fait de la plus grande ouverture. Pour cette raison, il a été jugé nécessaire de compléter les études de conception des quadripôles par la réalisation de deux modèles de validation.



Photo des quatre couches internes et externes de bobinage réalisées au CEA-Saclay.



Conception magnétique du quadripôle à double ouverture de 90 mm composé des bobines en NbTi, des colliers de frettage en acier austénitique et de la culasse en fer. Le schéma montre la répartition du champ magnétique dans les colliers et dans la culasse lorsque le courant nominal circule dans les deux ouvertures.

Quadripôle deux en un à grande ouverture

Un sous-projet du projet HL-LHC, nommé Hilumi-LHC, a débuté en 2011. Une des tâches concerne l'amélioration des aimants des zones d'insertion du LHC. En particulier, le SACM a la responsabilité des études magnétiques et mécaniques d'un des futurs quadripôles du triplet externe, le quadripôle Q4 à large ouverture (80 à 100 mm), qui devra remplacer le quadripôle actuel possédant une ouverture de seulement 70 mm. Une des contraintes magnétiques du quadripôle Q4 en NbTi est la double ouverture espacée de 194 mm permettant de faire circuler les deux faisceaux de particules en sens inverse. L'effet du couplage magnétique qui en découle a un impact sur la qualité du champ, notamment

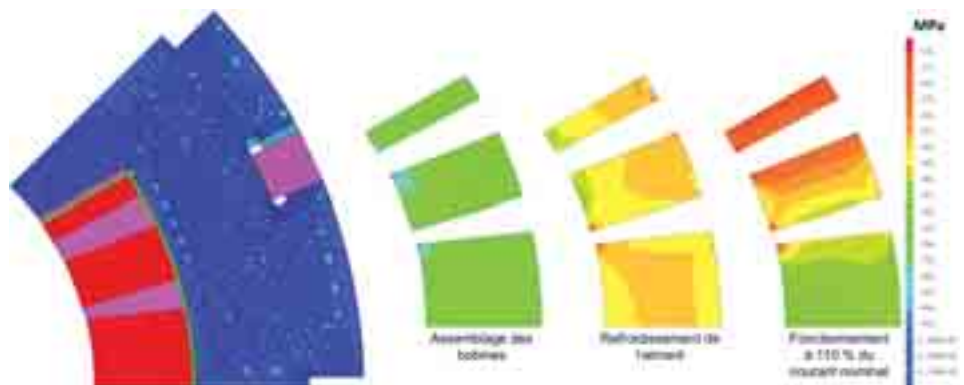
lorsque les courants qui circulent dans les aimants des deux ouvertures sont différents. L'ouverture actuellement retenue est de 90 mm et le câble est identique à celui des quadripôles des arcs du LHC. Les études mécaniques ont permis de valider le principe d'utilisation des colliers de frettage pour cette conception en simulant l'assemblage des bobines, le refroidissement de l'aimant et son fonctionnement à 110 % du courant nominal.

Le CEA-Saclay et le Cern sont en discussion pour définir quelle pourrait être l'implication du SACM dans la fabrication des futurs quadripôles Q4 à double ouverture à compter de 2013.

À gauche : modèle mécanique permettant de valider l'utilisation de colliers de frettage pour l'assemblage des bobines.

En rouge : les câbles supraconducteurs ; en bleu : la frette en acier. En raison de la symétrie, seul un octant est modélisé.

À droite : répartition des contraintes azimutales dans la bobine après l'assemblage des bobines, après le refroidissement de l'aimant et lorsque l'aimant fonctionne à 110 % du courant nominal.



Dipôle à haut champ en Nb₃Sn

Les activités de R&D de l'Irfu liées à l'utilisation du Nb₃Sn comme matériau supraconducteur pour les aimants à haut champ vont se concrétiser par la réalisation d'un aimant destiné à équiper Fresca 2, nouvelle station d'essais de conducteurs du Cern. Cet aimant est un dipôle en Nb₃Sn de 1,5 m de long et 100 mm d'ouverture, capable de fournir un champ sur l'axe de 13 T à 4,2 K, avec une homogénéité de l'ordre de 1% sur 700 mm. Les études de conception du dipôle ont débuté dès septembre 2009.



Essai de cintrage des têtes de bobines. Celles-ci sont orientées vers le bas lors de l'opération de bobinage.

En collaboration avec le Cern, le SACM a réalisé les études magnétiques et mécaniques du dipôle. Une configuration en blocs a été retenue pour les bobines : chaque pôle est constitué de deux bobines en forme d'hippodrome formées chacune de deux couches de conducteur ayant les têtes inclinées pour laisser la place au tube faisceau. Le dipôle sera réalisé avec 1 km de câble du type Rutherford constitué de 40 brins de 1 mm de diamètre. Dans le cadre du partenariat avec le Cern, le SACM a assuré l'approvisionnement de brins supraconducteurs en Nb₃Sn chez deux fournisseurs qui proposent deux technologies différentes, PIT (*powder in tube*) et RRP (*restacked rod process*), ce qui impose de dupliquer les études sur le comportement des câbles du

point de vue supraconducteur et mécanique. Actuellement, des tests sont en cours pour évaluer les changements dimensionnels des câbles lors de la réaction thermique qui pourraient entraîner des contraintes dans le conducteur et sa dégradation si la structure de la bobine et l'outillage ne sont pas adaptés. Différents outillages spécifiques ont été développés pour les tests de bobinage qui ont permis de choisir la meilleure géométrie pour le saut de couche, de montrer la faisabilité des têtes dans la

configuration en blocs et d'affiner leur géométrie, puis de valider le bobinage « tête vers le bas ».

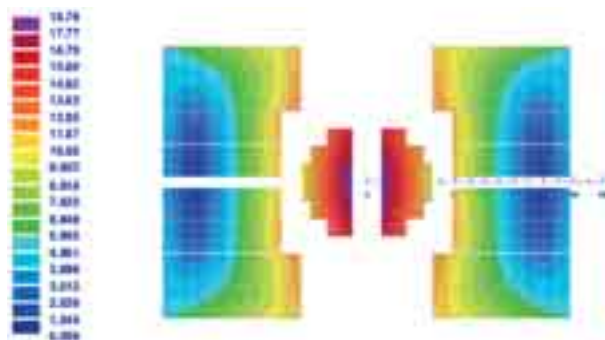


Maquette à l'échelle 1 de l'insert dipolaire.

Les modèles thermiques du dipôle sont maintenant disponibles et des calculs en régime stationnaire et transitoire dans l'hélium ont été réalisés pour étudier le comportement de l'aimant lors de son refroidissement, ou lors d'un *quench*. Des modèles numériques 2D et 3D ont aussi été développés pour valider le système de protection de l'aimant, constitué de 4 chaufferettes réparties sur les faces des bobines et de résistances de décharge. L'étude détaillée des bobines et de la structure de la masse froide est terminée, ainsi que celle des outillages de bobinage, de réaction et d'imprégnation. L'approvisionnement de ces outillages est en cours d'achèvement et nous avons reçu les composants nécessaires à la réalisation d'un prototype de bobine à l'échelle 1, en cuivre, dont la fabrication devrait démarrer en juin 2013. La fabrication des bobines en Nb₃Sn est prévue fin 2013 et le test du dipôle en 2014.

Insert dipolaire en supraconducteur à haute température critique

Atteindre des champs d'induction de l'ordre de 20 T est un réel défi accessible uniquement grâce aux supraconducteurs à haute température critique tels l'YBaCuO. Au sein du programme européen Eucard, le SACM a la responsabilité de la construction d'un insert dipolaire en YBaCuO générant un champ magnétique de 6 T à 4,2 K dans le dipôle Fresca 2 de 13 T. Les défis se situent au niveau de la mécanique pour contenir les forces très élevées et au niveau de la protection pour ne pas risquer de détruire l'aimant lors de l'apparition d'un défaut. Les conceptions magnétique et mécanique de cet aimant sont terminées. Il sera constitué de 3 bobines à double couche en forme d'hippodrome, assemblées autour d'un pôle central en fer doux et maintenues par des mâchoires en inox et un cylindre extérieur en inox. Les composants de l'insert sont en cours de réalisation. Un prototype constitué d'une couche simple de bobinage va être prochainement réalisé afin de mesurer la densité de courant transporté par le ruban supraconducteur en fonction de l'orientation du champ magnétique extérieur. L'insert lui-même sera bobiné et assemblé au cours de l'année 2013.



Champ magnétique de l'insert dans l'aimant Fresca 2 (valeurs en teslas).

Utilisation des supraconducteurs à haute température critique

Les matériaux supraconducteurs à haute température critique apportent des perspectives nouvelles : en effet non seulement leur capacité à transporter un courant électrique intense à l'état supraconducteur est maintenue jusqu'à des températures supérieures à 60 K pour certains d'entre eux, mais surtout ils conservent leurs propriétés supraconductrices sous des inductions de 30 T, à condition d'être maintenus à la température de l'hélium liquide. Ils ouvrent ainsi la possibilité de réaliser, d'une part, des aimants supraconducteurs fonctionnant entre 30 et 40 K et, d'autre part, des aimants produisant des champs magnétiques de 30 T.



Ruban de supraconducteur de seconde génération monté sur une bobinette Vamas prête pour être testée.



Double galette d'YBaCuO instrumentée prête à être assemblée sur la canne de test sous champ magnétique.

Le projet SuperSmes est une collaboration avec les laboratoires de Grenoble – G2ELab, Institut Néel et LNCMI – dédiée au stockage de l'énergie magnétique grâce à l'utilisation des supraconducteurs à haute température critique. C'est une partie de la R&D du SACM sur ces matériaux innovants.

Le projet a pour objectif d'atteindre une densité d'énergie spécifique stockée dans un bobinage supraconducteur de 20 kJ/kg, soit un gain de 45 % par rapport au record mondial au début du projet. Il démontrera ainsi la faisabilité de systèmes de stockage magnétique. Les caractérisations de conducteurs industriels de type YBCO (*yttrium barium copper oxide*) ont validé les performances des conducteurs jusqu'à 20 T et 30 K et permis de déterminer les lois de comportement des rubans existants.



Des prototypes d'aimants à forte densité d'énergie spécifique ont été réalisés et ont atteint les objectifs du programme. Ces résultats permettent d'envisager la réalisation d'un système de stockage d'énergie complet, système qui aurait des applications sur les lanceurs électromagnétiques ou les sources impulsionnelles de courant de forte puissance. D'autres applications identifiées des matériaux supraconducteurs à haute température critique comme le composé YBCO sont la production de champs magnétiques supérieurs à 20 T pour la résonance magnétique nucléaire à haut champ et la lévitation magnétique qui permet de supprimer localement l'effet de la gravitation terrestre.

Solénoïde en ruban d'YBCO monté sur la canne de test et prêt à être testé sous une induction de 18 T dans les stations d'essais du LNCMI de Grenoble.

Utilisation du MgB_2 pour des aimants supraconducteurs secs

Le diborure de magnésium (MgB_2) est un matériau dont les propriétés supraconductrices ont été découvertes en 2001. Il présente une température critique de 39 K ce qui le classe dans les supraconducteurs à température critique intermédiaire, entre les basses températures critiques, comme le niobium titane ($NbTi$) et le niobium étain (Nb_3Sn), et les hautes températures critiques comme les cuprates. Sa découverte a suscité un vif intérêt car ses constituants sont bons marchés et son procédé de fabrication est semblable à celui des supraconducteurs classiques. Il pourrait donc à terme se substituer au classique $NbTi$. Seuls deux fabricants dans le monde proposent des rubans ou des fils avec ce matériau : Columbus en Italie et HyperTech aux États-Unis.

Les propriétés supraconductrices actuelles du MgB_2 laisse envisager la réalisation d'aimants fonctionnant à une température de l'ordre de 10 K jusqu'à un champ magnétique de 4 T. Il est alors possible de concevoir une cryogénie sans hélium en utilisant des cryogénérateurs comme source de froid.

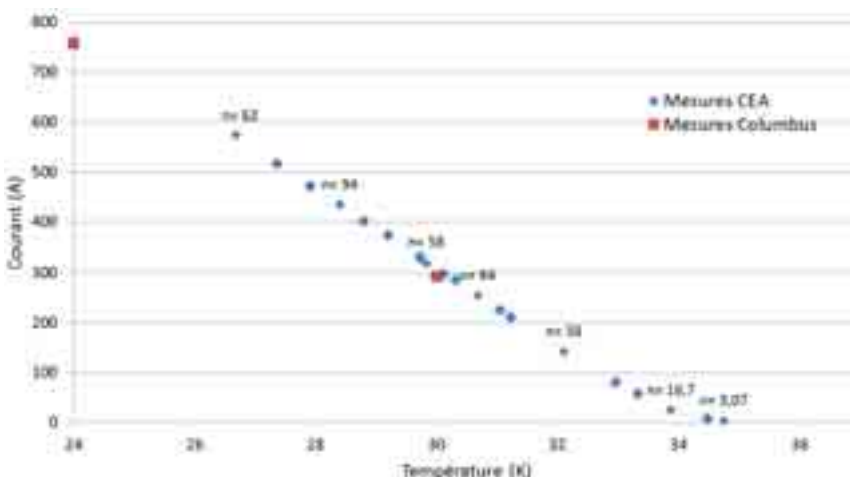
Cette perspective a conduit le service à démarrer un programme de R&D qui vise à développer les outils de dimensionnement et les outils techniques permettant la réalisation de tels aimants. Deux axes de recherche sont étudiés : la cryogénie spécifique à ce type d'application (amenées de courant, contact thermique isolant électrique, ...), la conception de l'électroaimant (caractérisation du fil supraconducteur sous champ magnétique à différentes températures, protection de l'aimant en cas de transition, technique de bobinage, ...).



Les travaux ont débuté fin 2011 dans le cadre d'une thèse en partenariat avec la société SigmaPhi. Une station de caractérisation sans hélium permettant de mesurer, jusqu'à 600 A et 3 T, le courant critique d'un ruban de MgB_2 d'une longueur de plus d'un mètre sur un cylindre de 300 mm de diamètre à des températures de 10 K à 40 K a été réalisée. Les premiers résultats en champ propre ont été obtenus début 2013.

Les prochains objectifs du SACM sont le bobinage de doubles galettes de test et le bobinage d'un solénoïde permettant de générer 1 T dans un champ magnétique de fond de 3 T. Ces prototypes permettront de définir les marges de fonctionnement nécessaires à ce type d'aimant et d'étudier leur protection.

Station de test sans hélium pour mesure du courant critique d'un ruban de MgB_2 .



Mesure du courant critique en champ propre d'un ruban de MgB_2 de la société Columbus ; n est l'indice de transition.

quand l'énergie devient matière

Les plateformes d'expérimentation



Stations d'essais d'aimants supraconducteurs et de composants de grandes dimensions

Station W7-X

Essais en courant, tension d'isolement, déformation, perte de charge et température d'aimants refroidis par de l'hélium supercritique en circulation forcée entre 4,5 K et 7,6 K.

- 2 cryostats : diamètre utile de 5 m ; hauteur utile de 4,1 m.
- Réfrigérateur associé de 200 W à 4,2 K.
- Acquisition des capteurs cryogéniques jusqu'à 500 Hz et des mesures de tension jusqu'à 20 kHz.



Schema – Station cryogénique horizontale pour essais magnétiques

Essais d'aimants supraconducteurs à des températures comprises entre 1,8 K et 4,2 K.

- Cryostat horizontal : diamètre utile de 0,6 m ; longueur utile de 8 m.
- Alimentation de 20 kA sous 5 V, stabilisée à 10^{-4} .
- 160 voies de mesures à 20 kHz.

Station verticale

Tests de sous-ensembles à basse température (en bain d'hélium ou sous vide).

- Cryostat enterré, vertical.
- Diamètre utile de 0,88 m.
- Hauteur maximale sous vide de 7,9 m dont 7 m écrantés à 80 K.
- Alimentation électrique de 20 kA.

Station JT-60SA

Essais en courant, tension d'isolement, perte de charge et température d'aimants refroidis par de l'hélium supercritique en circulation forcée (circulateur froid) entre 5 K et 7,5 K.

- 1 cryostat oblong : longueur de 10 m ; largeur de 6,5 m ; hauteur utile de 2 m.
- Réfrigérateur associé de 490 W à 4,2 K + 3,6 g/s de 50 K à 300 K + 1 satellite avec un circulateur froid CP980 de 30 g/s pour une boucle secondaire.
- Alimentation électrique de 25 kA.
- Acquisition des capteurs cryogéniques jusqu'à 500 Hz et des mesures de tension jusqu'à 50 kHz.

Stations de tests sous champ magnétique



Seht – Station d'essais huit teslas
Test de prototypes ou de sous-ensembles sous champ magnétique (8 T).

- Ouverture utile : 587 mm à température ambiante.

Cétacé – Cryostat d'essais à température ajustable et champ élevé
Mesures de courant critique de supraconducteurs.

- Courant maximal dans l'échantillon : 2000 A.
- Champ magnétique maximal : 17 T.
- Diamètre utile de l'anticryostat : 49 mm.
- Température de l'échantillon : 1,8 K à 200 K.

Christiane

Mesures de courant critique de supraconducteurs à 4,2 K.

- Courant maximal dans l'échantillon : 3000 A.
- Champ magnétique maximal : 7 T.
- Diamètre utile de l'aimant : 90 mm.

Supratech : plateforme de recherche technologique sur les cavités accélératrices supraconductrices

Cryholab – Cryostat horizontal de laboratoire (propriété Irfu-IN2P3)

Tests de cavités supraconductrices dans les conditions identiques à celles d'un accélérateur.

- Coupleur de puissance radiofréquence : 80 kW en continu ; jusqu'à 1 MW en pulsé.
- Groupe de pompage associé à un réfrigérateur Hélium 4012 : 80 W à 1,8 K et 13 mbar.
- Dimensions internes utiles : 1,5 m de long et 70 cm de diamètre.



Bancs de tests de coupleurs de puissance

Les composants RF peuvent être testés en onde progressive et en onde stationnaire.

- 1 banc de 704 MHz avec un fonctionnement pulsé de 1 MW crête, impulsion de 2 ms à la fréquence de 50 Hz (100 kW moyen)
- 1 banc de 1300 MHz avec un fonctionnement pulsé de 2 MW crête, impulsion de 1 ms à la fréquence de 10 Hz (20 kW moyen).
- 1 banc de 704 MHz-80 kW continu ; système stable jusqu'à 50 kW.

Laboratoire de chimie et salle blanche

Laboratoire de chimie

- 8 sorbonnes pour le traitement des échantillons et des cavités, dont une installation de chimie intégrée (installation fermée qui permet de traiter uniquement la surface interne par des acides filtrés, réduisant ainsi les risques de contamination).
- Abri de stockage attendant (acides, solvants).
- Installation de traitement des effluents (eau, acides, vapeurs).
- 2 stations de dégraissage par ultrasons (10 l, 120 l).



Salle blanche de 170 m², compartimentée en 3 classes ISO : 7, 5 et 4
Assemblage des cavités après un rinçage à haute pression.

- Salle blanche de classe ISO 4 : 112 m².
- Sas de lavage pour le nettoyage extérieur des cavités avant leur entrée en salle blanche.
- Boucle d'eau ultrapure et ultrafiltrée.
- Rinçage haute pression à l'eau pure ultrafiltrée.

Installations complémentaires

- Installation de traitement d'eau pure et ultrapure (4 m³/h).
- Groupe de production frigorifique de 179 kW.
- Hall d'assemblage de 370 m² avec une unité de lavage permettant la manipulation de charges jusqu'à 20 t.

Cryostats verticaux CV

Mesure du champ accélérateur et du coefficient de surtension de cavités supraconductrices à radiofréquence.

- 2 groupes de pompage : 1 g/s à 13 mbar.
- 1 source RF de 200 W cw, 700 MHz à 1500 MHz
- 1 source RF de 80 W cw, 4200 MHz à 8600 MHz.

CV1

- Diamètre utile : 0,7 m, hauteur : 2,92 m.
- Hauteur He : 1,9 m à 4,2 K et 1,2 m à 1,7 K.
- Consommation : 1500 l d'He par test.

CV2

- Diamètre utile : 0,45 m, hauteur : 1,7 m.
- Hauteur He : 1 m à 4,2 K et 0,6 m à 1,7 K.
- Consommation : 450 l d'He par test.

Stations de caractérisation à froid



Mesures en hélium superfluide pressurisé à 1 atm

- Cryostat double bain NED. Volume à 1,8 K : diamètre 250 mm x hauteur 300 mm
- Cryostat double bain Th0. Volume à 1,8 K : diamètre 200 mm x hauteur 500 mm

Mesures du RRR (residual resistivity ratio)

- Mesures du RRR d'échantillons de 100 mm x 3,5 mm.
- Cryostat : diamètre utile de 0,15 m, hauteur de 0,9 m.
- Consommation : 20 l d'He par test.

Mectic – Mesure de conductivité thermique d'isolants et de conducteurs

- Tête froide (cryogénérateur) permettant des mesures sur des échantillons d'une trentaine de centimètres sur une gamme de température de 3,8 K à 300 K.

Mesures de résistance de Kapitza et de conductivité thermique

- Échantillon de faible épaisseur (0,5 mm), jusqu'à 80 mm de diamètre.
- Gamme de température : 1,7 K à 2,1 K.

Thermosiphon

Caractérisation d'écoulements monophasiques et diphasiques par des mesures de débit massique, de titre, de pertes de pression et de température en paroi le long d'une section de test verticale (1,2 m) et horizontale (0,4 m).

- Débit massique d'hélium liquide de 0 à 22 g/s ou d'azote liquide de 0 à 40 g/s.
- Débit massique d'hélium gazeux de 8 g/s ou d'azote gazeux de 40 g/s.
- Puissance dissipable dans la boucle : 500 W.

Thermautonome

Caractérisation d'écoulements monophasiques et diphasiques sur une boucle fermée équipée d'une tête froide (cryogénérateur) ; mesures de pertes de pression et températures de paroi.

- Cryogénérateur : 1,5 W à 4,2 K.
- Pression : de quelques mbar à 3 bar.
- Température : de 3 K à 30 K.

Laboratoires et ateliers

Laboratoire d'essais mécaniques

Mesures à 300 K et aux températures cryogéniques : 77 K (azote liquide) et 4,2 K (hélium liquide) : détermination du module d'Young et des caractéristiques à la rupture (contrainte, déformation...) des matériaux métalliques ou composites ; tests (glissement, déformation...) des assemblages mécaniques.

- Presse hydraulique d'une capacité de 2000 kN en compression.
- Presse électromécanique Instron de 300 kN en traction et en compression.
- Presse électromécanique Instron de 150 kN, en traction et en compression, équipée de 2 cryostats pour des essais à température cryogénique :
 - Cryostat d'une capacité de 60 kN pour les essais de traction et de flexion.
 - Cryostat d'une capacité de 150 kN pour les essais de compression.



Laboratoire d'imprégnation

Support technique aux projets du service pour l'isolation et l'imprégnation d'aimants supraconducteurs : imprégnation de prototypes ou d'éprouvettes de caractérisation, mise en œuvre de résines, préparation de conducteurs avant caractérisation via la dissolution de l'aluminium ou du cuivre.

Laboratoires et ateliers

Laboratoire vide et matériaux

Le laboratoire vide et matériaux prend en charge le calcul du vide des accélérateurs, la recherche sur la désorption

des matériaux, le développement de la technique d'ultravide et de la mécanique du vide.

- Four à ultravide 1200 °C, 10⁻⁶ Pa.

Atelier de bobinage

L'atelier est équipé de 4 machines à bobiner : 2 d'entre elles permettent de réaliser des aimants solénoïdaux, le diamètre extérieur maximal étant de 2 m,

les 2 autres sont dédiées aux bobinages avec axe de rotation vertical et permettent de réaliser des bobines pour aimants d'accélérateurs de longueur pouvant aller jusqu'à 3 m ou des bobinages en galettes.



Atelier de mécanique

L'atelier de mécanique aide à la réalisation des prototypes du SACM et permet de répondre aux besoins urgents des expériences dans le cas de modifications ou de reprises imprévues. Il est équipé de 5 tours, 5 fraiseuses, 1 rectifieuse plane et une dizaine de machines diverses (perceuses, scies,...) pour le travail sur les matériaux métalliques. Il s'est doté en 2009, d'une section d'usinage pour matériaux composites qui comprend un tour, une fraiseuse, une perceuse et une scie à ruban.

Réfrigérateurs et liquéfacteurs d'hélium

Liquéfacteur-réfrigérateur Héliol 4012 associé à Cryholab

- En liquéfaction : environ 140 l/h à 4,2 K.
- Puissance de réfrigération : environ 80 W à 1,8 K avec groupe de pompage de 2 à 4 g/s pour 13 à 26 mbar.

Liquéfacteur-réfrigérateur Cello associé à la station d'essais JT-60SA

- En liquéfaction : environ 120 l/h.
- Puissance de réfrigération : environ 400 W à 4,2 K.

Liquéfacteur-réfrigérateur Héliol 4003 associé à la station d'essais W-7X

- En liquéfaction : environ 70 l/h.
- Puissance de réfrigération : environ 200 W à 4,2 K.

Liquéfacteur Héliol 4008 de la station de liquéfaction

- En liquéfaction : environ 70 l/h.
- Livraison d'hélium liquide en 2012 : 173 000 l.

Station de réfrigération en eau

Stare – Station de réfrigération en eau

Cette station de refroidissement est constituée de deux circuits : un primaire et un secondaire.

- **Circuit primaire.** Ce circuit refroidit les plateformes de tests implantées dans l'installation 218 (Iphi, Supratech, Ifmif, Spiral 2, Sophi). L'eau circulant dans ce circuit est déminéralisée (10 MΩ.cm) avec un débit total pouvant atteindre 600 m³/h.

De plus ce circuit peut fournir de l'eau glacée (9 - 11 °C) avec un débit de 147 m³/h grâce à compresseur frigorifique dont la puissance est de 1200 kW.

- **Circuit secondaire.** Ce circuit refroidit l'eau du circuit primaire au travers d'un échangeur à plaques de 10 MW. Il est relié à une tour aéroréfrigérante semi ouverte à tirage forcé dont la puissance thermique éliminée est de 8 MW avec un débit de 600 m³/h et une évaporation maximum d'eau de 11 m³/h.

Qualité, sécurité et environnement au SACM

Le Service des accélérateurs, de cryogénie, et de magnétisme de l'Irfu intègre dans ses activités les démarches environnementales et de maîtrise des risques déployées par le CEA Saclay. Le SACM regroupe deux périmètres de sécurité du site (installations n° 82 et n° 218). Ceux-ci représentent environ 32 000 m² pour 18 bâtiments et un effectif moyen de 162 salariés. Ils abritent 6 lots d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et ont été certifiés ISO 14001 en 2009. L'équipe « sécurité-environnement » du service est composée d'un Chef d'installation (CI) titulaire, de deux suppléants, conseillés par deux Ingénieurs de sécurité d'installation (ISI) et plusieurs animateurs de sécurité (AS). Chaque ISI assure également les missions d'Interlocuteur environnement (IE), de Correspondant déchets, de Gestionnaire de sources radioactives et de co-correspondant travaux. Compte tenu de la dispersion, de l'étendue et des nombreuses activités des bâtiments, 32 chefs d'exploitation (titulaires et suppléants) y relayent l'équipe sécurité sur certaines de leurs missions.

Installation n° 82

Le périmètre regroupe les laboratoires LCSE et LÉAS du SACM.

- ▶ 12 bâtiments
- ▶ 10 000 m²
- ▶ 80 salariés CEA
- ▶ 3 lots d'ICPE
- ▶ 4 ELPS (Équipes locales de premiers secours)

Les activités concernent les stations d'essais cryogéniques d'éléments supraconducteurs (échantillons ou aimants complets), les laboratoires d'isolation-imprégnation, de bobinage, d'intégration, de mesures magnétiques et l'atelier de mécanique. Par ailleurs, une station de liquéfaction et de réfrigération d'hélium est en place. Elle livre en moyenne 150 000 litres d'hélium par an au SACM, au CEA, et à l'extérieur du CEA.

La période 2010-2012 est marquée par la réalisation des tests pour les projets Iseult et R³B-Glad.



Masse froide de l'aimant Glad pour l'expérience R³B.

Installation n° 218

Cette installation a été créée en octobre 2005. Son périmètre regroupe les laboratoires Léda, LiDC2 et Lisah du SACM.

- ▶ 6 bâtiments
- ▶ 22 000 m²
- ▶ 82 salariés CEA (SACM, SPhN/Lénac, SIS)
- ▶ 3 lots d'ICPE
- ▶ 3 ELPS

Elle constituait principalement jusque fin 2005 l'Installation nucléaire de base (INB) n° 48 "Saturne". Celle-ci est aujourd'hui déclassée.

En termes de maîtrise des risques, la période 2010-2012 est notamment marquée par :

- ▶ la mise en exploitation de la plateforme Supratech complétée en 2009 du laboratoire de chimie et de la salle blanche ;
- ▶ la préparation de la phase industrielle pour l'intégration des 103 cryomodules XFEL ;
- ▶ la réalisation des essais liés aux injecteurs Spiral2 et Ifmif ;
- ▶ le déclassement de l'ICPE autorisée "Laboratoire de chimie" de l'Orme des Merisiers.



Salle blanche ISO 4.

Le réaménagement des halls pour accueillir les nombreux projets de l'installation (Cryholab, CV1 et CV2, XFel, Spiral 2, Iphi, Ifmif, GBar, Cocase, JT-60SA) occasionne des chantiers multiples et de grande envergure avec des co-activités importantes. Les principaux chantiers de la période 2010-2012 concernent :

- ▀ les travaux d'aménagement du "Village XFel" pour la prestation industrielle ;
- ▀ les travaux d'installation de la station d'essais JT-60SA ;
- ▀ les travaux préparatoires pour la nouvelle salle blanche R&D ;
- ▀ les travaux de rénovation et de mise en conformité des réseaux d'effluents industriels et d'eaux pluviales ;
- ▀ les travaux d'assainissement des sous-sols du Synergium pour supprimer les infiltrations d'eau et prévenir toute inondation d'origine naturelle ou d'origine industrielle ;
- ▀ les travaux d'isolation thermique du bâtiment 126 grâce au financement pluriannuel du Grenelle de l'environnement (changement de 3200 m² de bardage, isolation de terrasse et de lieux de stockage) ;
- ▀ les travaux de réaménagement des accès au Synergium.

La multiplicité des interférences au sein du Synergium est gérée à court terme par les réunions bimensuelles des chefs d'exploitation et, à plus long terme, par les réunions trimestrielles du plan d'occupation des sols avec les chefs de projets.



Transport exceptionnel du cryostat de la station de test des bobines de JT-60SA.

La qualité au SACM

La qualité au SACM s'inscrit dans le sens préconisé par l'Irfu et plus largement par le CEA dans le domaine de la qualité.

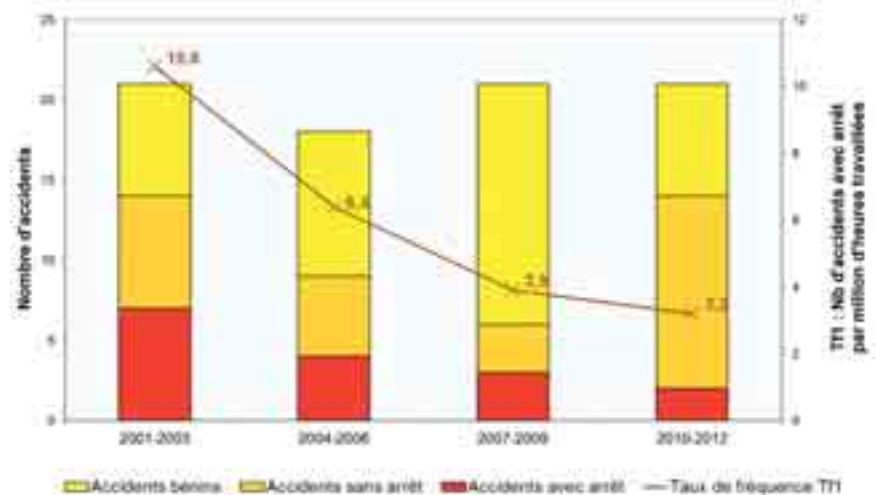
La qualité des projets est gérée par deux correspondants qualité se partageant deux secteurs : les laboratoires Léas et LCSE, d'une part, et les laboratoires Léda, Lisah et LiDC2, d'autre part. Les documents de références des projets du SACM sont stockés sur le réseau dapdc5 de l'Irfu. Entre autres documents on trouve les organigrammes des projets, les plans d'assurance qualité (PAQ), les *project management plans* (PMP), ... Les correspondants qualité peuvent aussi donner des conseils s'ils sont sollicités par les projets.

Indicateurs d'actions et de résultats de sécurité pour la période 2010-2012

	Total SACM
Dossiers de sécurité CLS	11
Visites de sécurité	36
Exercices de sécurité	17
Audits et inspections	12
Plans de prévention	105
Permis de feu	360
Jours de formation à la sécurité	500

Le SACM est l'un des services qui présentent le plus de nouveaux projets en phase de conception-avant travaux ou en phase d'exploitation devant la Commission locale de sécurité (CLS) de Saclay, afin d'obtenir leur autorisation par le Directeur de centre.

Depuis sa création en 2001, les résultats de la sécurité du SACM s'améliorent, notamment par la diminution de la fréquence et de la gravité des accidents survenus à ses personnels. Même si le nombre total des accidents quelle que soit leur gravité est resté stable, il faut noter que l'activité technique du service a fortement augmenté sur la période. Sur les six dernières années, le SACM a dépassé l'objectif du CEA qui était une diminution de 5 % du Tf1 inscrit dans chaque plan triennal d'amélioration de la sécurité au CEA : - 40 % entre 2007 et 2009, et - 18 % entre 2010 et 2012.



Évolution du nombre des accidents survenus aux personnels du SACM.

Rédacteurs de la brochure : Walid ABDEL MAKSOUND, Claire ANTOINE, Bertrand BAUDOUY, Nicolas BAZIN, Philippe BRÉDY, Pierre BOSLAND, Jean-Pierre CHARRIER, Nicolas CHAUVIN, Stéphane CHEL, Antoine DAËL, Guillaume DEVANZ, Mélanie DEVAUX, Olivier DELFERRIERE, Maria DURANTE, Fabien ÉOZÉNOU, Philippe FAZILLEAU, Alain FRANCE, Laurent GENINI, Jean-Marc GHELLER, Raphaël GOBIN, Bertrand HERVIEU, Olivier KUSTER, Michel LUONG, Catherine MADEC, Christophe MAYRI, Chantal MEURIS, Olivier NAPOLY, Jacques PAYET, Alain PAYN, Franck PEAugER, Olivier PIQUET, Juliette PLOUIN, Bruno POTTIN, Jean-Michel REY, Jean-Michel RIFFLET, Françoise RONDEAUX, Jérôme SCHWINDLING, Michel SEGRETI, Claire SIMON, Thierry SCHILD, Olivier TUSKE, Didier URIOT, Pierre VÉDRINE, Laurence VIEILLARD.

Réalisation : <http://reor.fr>

DSM-Irfu-SACM
CEA-Saclay
F- 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
<http://irfu.cea.fr/sacm>

SACM



Don A.

Chief de Service



Denny F.

Adjoints



Nappy O.



Benoit A.

Dalton B.

Francis A.

Zacquet E.

Moys C.

Prout Z.

Ray J.B.

Samir M.

Richard P.

Sofia Fugle E.

James H.

James C.

William L.

Thomas F.

Richard E.

Jeffrey J.M.

Frank O.

Richard B.

Dea Mawzad D.

Paul H.

Justin F.F.

Wanda L.

Thomas F.

Richard E.

Ulrich D.

Walter T.

Benjamin B.

Dea Soosa W.

Scott Y.

Eriche F.

Maria C.M.

Flavort A.

Samoua F.

Walter T.

Abdel Mawzad W.

Scott D.

Dechamps T.

Gertruda E.

Ruth O.

Wyn C.

Fern 2-L.

Stauder D.

Victoria M.

Adnan B.

Benoit A.

Dipherrine G.

Richard F.

Logans S.

Stephan D.

Fra C.

Richard F.

Walter B.

Amine C.

Brian D.

Devenny M.

Geoffrey Y.

Lama H.

Maurice C.

Phil D.

Sara V.

Wagner T.

Azura E.

Brian P.

Dominic L.

James L.

Le Dery P.

Monique S.

Richard J.S.

Shahid Y.

Wagner E.

Arthur E.

Comptons L.

Denise M.

Richard M.

Richard M.

Stephan D.

Figat D.

Richard M.

Selator J.

Carl James F.

Deanna J.G.

John E.

Larrianna T.

Nathan F.

Phan Z.

Sagrath B.

Victor L.

Bonnie E.

Giffels A.

Dagmar E.

Doc 2-2.

Larry P.A.

Nathalie C.

Richard F.

James F.

Victor B.

Timothy B.

Cheryl A.

Doreen N.

John P.

Lillian J.P.

Nora Z.

Patric E.

Samuel A.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Harry S.

Chaf C.

Ferdinand B.

Harrison B.

Bisot C.

Frederic E.

Almond B.

Stephan V.

Bernard C.

Chaf S.

Ferdinand F.

Hernault F.

Liang M.

Nguy F.

Quarier L.

Sony Y.

Richard C.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

Sabrina C.

Bonnie F.V.

Chouch H.

Ferdinand W.

Francis X.

Leclerc O.

Oger M.

Propylia A.

Sarah C.

Dean H.

Cherise J-P.

Estelle F.

Harold A.

Lacoste D.

Nyssa S.

Regina Z.P.

