Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

SACM **2013-2015**

Irfu
Institut de recherche
sur les lois fondamentales
de l'Univers

Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme 4

LES LABOS 7

Laboratoire de cryogénie et des stations d'essais (LCSE) 9
Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs (LÉAS) 9
Laboratoire d'études et de développements pour les accélérateurs (LÉDA) 10
Laboratoire d'intégration et de développement des cavités et des cryomodules (LIDC2) 11
Laboratoire d'ingénierie des systèmes accélérateurs et des hyperfréquences (LISAH) 11

LES ACTIVITÉS ET PROGRAMMMES 13

accélérateurs 15

L'injecteur de protons à haute intensité IPHI 16
L'accélérateur linéaire à protons de Fair 18
Spiral2 20
Saraf : un accélérateur linéaire « clef en main » 22
Ifmif (International Fusion Materials Irradiation Facility) 24
La source européenne de Spallation ESS 26
L'assemblage des cryomodules XFEL 28
Le collisionneur Clic 30
Les diagnostics pour accélérateurs de particules 31

cryogénie 35

Les cibles d'hydrogène liquide du projet Minos (Magic Numbers Off Stability) 36
La cible d'hydrogène solide pour le projet Chymène
(Cible d'Hydrogène Mince pour l'Étude des Noyaux Exotiques) 37
Caloducs cryogéniques oscillants 38
Space Radiation Superconducting Shield 39

magnétisme 41

Aimant MQYY pour HL-LHC 42
Fresca2 43
Le spectromètre supraconducteur Glad pour R^3B 44
Les dipôles super FRS pour Fair 46
Le système à haut champ 11,7 T Iseult pour la plate-forme Neurospin 47
La bobine supraconductrice pour l'aimant hybride du LNCMI 50
L'aimant Wave 51

R&D et développements technologiques 53

R&D sur les cavités supraconductrices à radiofréquences 54
Dynamique des faisceaux de particules 56
Développement des sources ECR : le concept Alisés 58
Accélération laser plasma 59
Les ADS 60
Demo 60
R&D Supra HTc 61
Supra HTc pour les aimants d'accélérateurs 63
Calculs de protection 65
Lotus 66
R&D sur le conducteur MgB_2 66
Modélisation numérique des transferts de chaleur en hélium superfluide 67
Techniques de refroidissement indirect 68
Transferts de chaleur transitoires dans une boucle diphasique de circulation en hélium 69

LES INFRASTRUCTURES : LE SYNERGIUM 71

plateformes technologiques et station d'essais 73

Le Synergium 74
La station d'essais Seht 74
La plateforme JT-60SA 75
Stations d'essais cryogéniques 76
Liquéfacteurs 77
Salles Blanches 77
Plateforme RF 352 MHz 78
Plateforme Betsi 78
Supratech Cryo/HF 79

laboratoires & ateliers 83

Laboratoire de chimie 84
Laboratoire isolation-imprégnation 84
Laboratoire diagnostique vide-assemblage (Diva) 85
Laboratoire d'intégration de diagnostics optiques (Lido) 85
Laboratoire d'essais mécaniques 86
Laboratoire de bobinage 87
Atelier mécanique 87

LES SUPPORTS 89

informatique/secrétariat 91

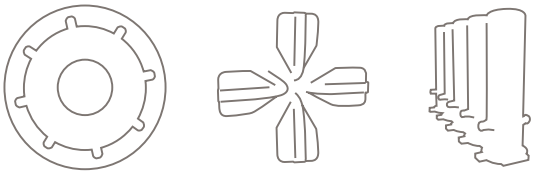
La cellule informatique 92
Les secrétariats 93

qualité, sécurité et environnement 95

Prévention des risques professionnels et environnementaux 96
La qualité 98

DIFFUSION DU SAVOIR 101

Communication 103
Enseignement 104
Valorisation - Transfert de Technologie 106
Faits marquants 108
Le SACM dans le monde depuis 2013 112
Entités et organismes 114
Les publications 119



Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

Le SACM est l'un des six services de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (Irfu) de la Direction la Recherche Fondamentale du CEA.
Il déploie ses activités dans les locaux de l'ancien Laboratoire National Saturne, le LNS, et de l'ancien service des techniques instrumentales de particules élémentaires, le Stipe. Ses locaux rénovés, forment sur plus de 25 000 m² une grande infrastructure technologique baptisée « Synergium ».

La mission du SACM est de développer et réaliser des accélérateurs de particules, des sources d'ions, des cavités accélératrices, des systèmes cryogéniques et des aimants supraconducteurs destinés aux programmes scientifiques de l'Irfu et plus largement du CEA. Il s'appuie sur des moyens d'assemblage, d'intégration et d'essais importants, allant de halls de bobinage et d'assemblage d'aimants, en passant par de grandes salles blanches pour les systèmes accélérateurs et des petites stations d'essais pour caractériser les matériaux, jusqu'à des stations de très grande taille capables de tester des ensembles complets (bobines, cavités supraconductrices et injecteurs).

Le SACM a pour vocation d'assurer la conduite de projets de grande envergure, en collaboration avec les autres services de l'Institut et de nombreux partenaires nationaux, européens et internationaux, et de développer les moyens d'essais correspondants.
Le SACM mène aussi une R&D forte qui prépare l'avenir de nos technologies pour offrir les instruments nécessaires aux progrès de la recherche fondamentale et appliquée.

La vitalité de cette R&D repose sur des équipes regroupées autour de thématiques porteuses (nouveaux concepts d'accélérateurs, nouveaux matériaux pour cavités, cryomodules en mode continu, efficacité des sources radiofréquences, modes de refroidissements cryogéniques innovants, aimants à haut champ, etc.) et qui accueillent des jeunes doctorants et postdoctorants. Pour cela le SACM a le souci de garder un nombre de thèses suffisants et un contact avec les formations universitaires de nos domaines par le biais d'enseignements délivrés par des ingénieurs et techniciens du service.

Pour aider le chef du SACM à élaborer la stratégie de recherche et de développement du service, un conseil scientifique et technique de service, le CSTS, composé de 15 membres se réunit plusieurs fois par an. Une session spéciale a lieu une fois par an avec 7 experts internationaux extérieurs au CEA et la direction de l'Irfu pour dresser le bilan annuel des activités en cours et analyser les nouvelles propositions de projets et les orientations futures de la R&D.

Enfin, le transfert technologique à l'industrie est une mission importante du service qui s'évalue par le nombre de brevets publiés et de licences transférées.

Depuis de nombreuses années, le SACM joue un rôle majeur dans la construction des instruments de haute technologie nécessaires aux projets de recherche de l'Institut (LHC, W7-X, Spiral2, Fair, Iphi, etc.).
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) et de neutrons (ESS).

Le SACM accueille au sein de ses cinq laboratoires 80 ingénieurs-chercheurs et 43 techniciens en contrats permanents et plus de 36 collaborateurs non permanents. L'émergence de nombreux projets en phase d'étude et de réalisation a permis le recrutement d'ingénieurs et de techniciens dans les dernières années. Ce renouvellement permet de stabiliser la moyenne d'âge du service et de préparer le remplacement des nombreux départs en retraite prévus dans les cinq ans à venir.

Les trois dernières années ont été jalonnées de nombreux succès : les injecteurs Spiral2 au Ganil à Caen et Ifmif à Rokkasho au Japon ont accéléré leur premier faisceau à leur énergie nominale. La masse froide de l'aimant d'imagerie médicale du projet Iseult est maintenant complètement assemblée. Elle comprend les 30 tonnes des bobines de blindage et les 80 tonnes de l'aimant principal. La station de tests des bobines toroïdales de JT-60 SA est aussi complètement validée et est prête à accueillir sa première bobine. Le dipôle supraconducteur de grande acceptance R^3B-Glad a été livré au GSI à Darmstadt. La phase industrielle de l'assemblage des cryomodules XFEL a vu un remarquable accroissement de la productivité ; 52 cryomodules ont été produits en 2015 et le 80e a pu être mis à disposition d'XFEL pour le 24 décembre 2015.
Les trois prochaines années vont être riches de nouveaux enjeux avec la mise en service de l'injecteur Iphi à Saclay, de celui d'Ifmif-Lipac à Rokassho et la livraison de l'injecteur de protons au projet Fair à Darmstadt. La participation du SACM au projet de source de spallation ESS à Lund portera sur la réalisation de l'injecteur et des premiers cryomodules accélérateurs moyen beta et haut beta. Le projet d'accélérateur supraconducteur Saraf pour Soreq passera en phase de réalisation. Le SACM continuera à contribuer aux efforts sur les nouvelles techniques d'accélération au travers des projets Cilex et Eupraxia. Dans le domaine du cryomagnétisme la station de test des bobines de JT-60SA verra la fin des tests des 18 bobines toroïdales en 2017 et ouvrira des prolongements technologiques vers le programme Iter. Le spectromètre R^3B-Glad sera mis en service à GSI ainsi que l'aimant Iseult à Neurospin. Le SACM participera de façon majeure avec le Cern aux développements de nouveaux aimants à champ élevé nécessaires à l'augmentation de luminosité et d'énergie du LHC. Il participera aussi aux nombreux programmes européens tournés vers le développement des accélérateurs et des aimants supraconducteurs (Eurocircol, Aries…) et des plateformes et infrastructures technologiques associées (Amici).

D'ici 2020, le SACM va vivre au fil de ces nombreux projets et actions de R&D de nouvelles aventures technologiques à la hauteur des missions scientifiques du CEA. Le SACM poursuivra aussi son intégration au sein des départements de recherche de la nouvelle Université Paris-Saclay.

L'organisation du SACM

Le SACM est structuré en 5 grands laboratoires technologiques qui reprennent chacun les grandes thématiques de nos activités résumées dans la présentation des laboratoires :

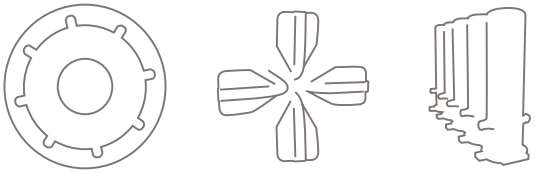
- Le LCSE Laboratoire de cryogénie et stations d'essais.
- Le LÉAS Laboratoire d'études sur les aimants supraconducteurs.
- Le LÉDA Laboratoire d'études et développements des accélérateurs.
- Le LIDC2 Laboratoire d'intégration et développement des cavités et des cryomodules.
- Le LISAH Laboratoire d'ingénierie des systèmes accélérateurs et hyperfréquences.

L'équipe de direction correspond au 6e. « laboratoire » (la DIR) et comprend le personnel et les moyens communs aux laboratoires principalement attachés à la sécurité, le suivi qualité, l'environnement, la gestion des infrastructures, la gestion d'un magasin, la compilation des plans de charges, et le fonctionnement de 3 secrétariats.

Les 5 laboratoires technologiques sont distribués géographiquement dans plus de 12 bâtiments intégrant des zones d'assemblage, des plates-formes d'essais, des salles de travaux, des salles de réunion et autres bureaux. En 2016, 80 ingénieurs et 43 techniciens et administratifs permanents ainsi que 36 salariés temporaires (CDD, post-doc, stagiaires) ont travaillé sur nos programmes.

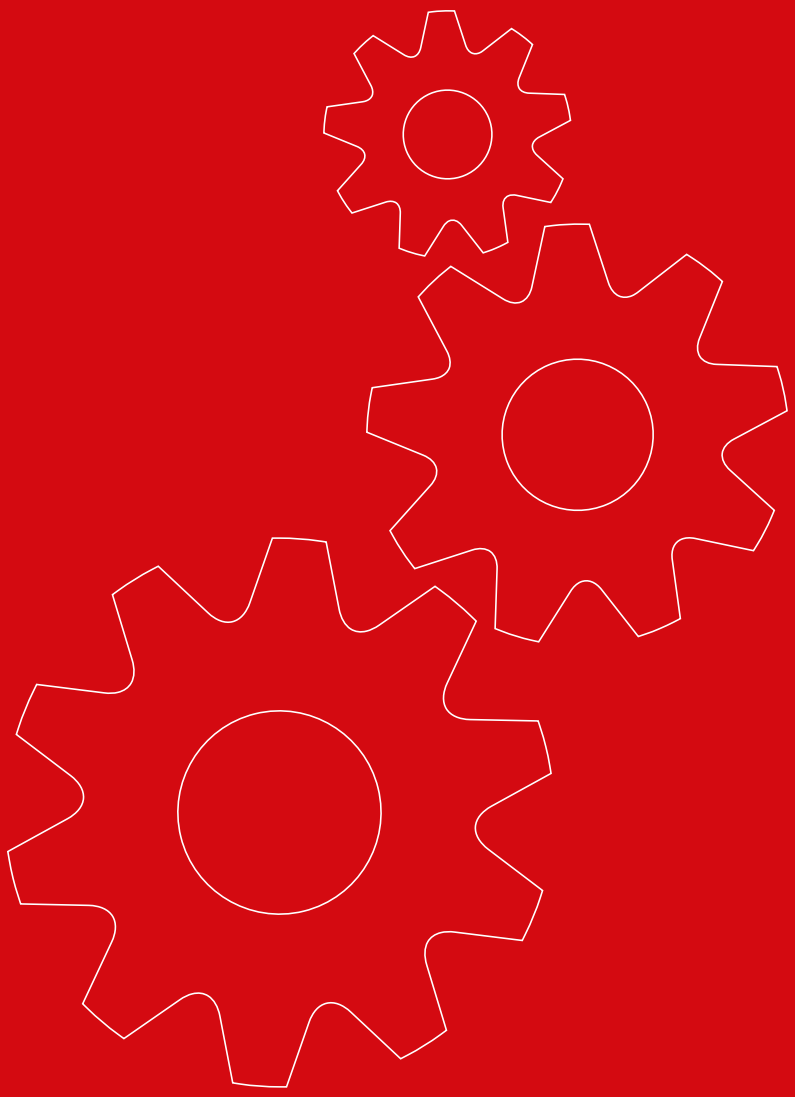
Pour porter les nombreux projets (près de 40 projets en 2015) dans lesquels le SACM est impliqué, la structure croisée de notre organisation entre ces 5 laboratoires et les projets offre la possibilité de mettre en place des équipes projet pluridisciplinaires apportant une bonne synergie dans la recherche de solutions et leurs mises en œuvre avec des choix technologiques pertinents. Pour suivre les activités du service, le Conseil d'Unité composé de 12 membres se réunit 2 fois par an et examine les questions du personnel sur l'organisation, les ressources et les activités du service.

Pour encadrer les choix de programmes et des évolutions souhaitables pour l'avenir de nos activités, le Conseil Scientifique et Technique de Service (et ses 8 membres élus et 8 membres nommés) s'est réuni 4 fois par an. Ses membres ont ainsi pu évaluer la pertinence des sujets de thèses proposés, les thèmes et sommes alloués à la R&D interne supportée par le budget du service, les propositions de stages, les réponses collectives à donner aux sollicitations d'organismes scientifiques extérieurs (AERES, P2IO, Université Paris-Saclay…) et débattre avec des experts extérieurs au CEA des programmes/projets en cours et à venir lors de CSTS externes organisés tous les ans.



les LABOS

SACM **2013-2015**



LABORATOIRE DE CRYOGÉNIE ET DES STATIONS D'ESSAIS (LCSE)

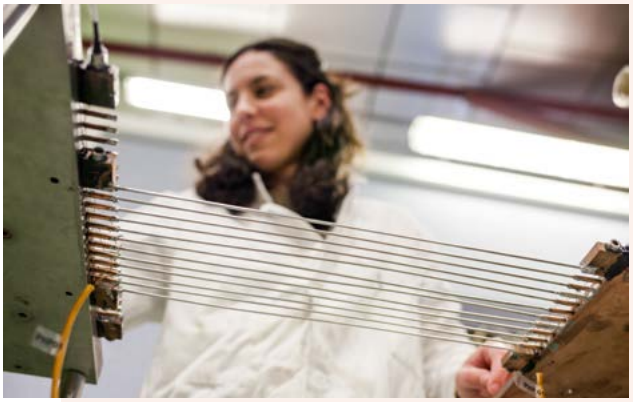
La mission du **Laboratoire de Cryogénie et des Station d'Essais** est la maîtrise de la cryogénie à l'usage de la physique dans les domaines des aimants supraconducteurs, des cavités accélératrices, des détecteurs de physique (cibles cryogéniques, calorimètres) et de la production et distribution d'hélium 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 utilisés dans nos systèmes sont l'hélium I et II, l'azote, l'argon ou l'hydrogène. Les études et réalisations portent principalement 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 (« cryoplant »). Les principaux développements technologiques sont axés sur l'amélioration des modes de refroidissement et de maintien aux basses températures (optimisation des liens thermiques, intégration de boucle de refroidissement ou de cryogénérateur). Ils concernent aussi la mise au point et l'intégration de cibles cryogéniques en hydrogène liquide ou solide, pour la physique nucléaire.

Pour ses développements et les demandes des projets, le laboratoire gère plusieurs stations d'essais et de caractérisation qui forment un ensemble de 16 équipements complémentaires permettant de déterminer les propriétés mécaniques, thermiques et électriques de divers matériaux (isolants, composites, alliages métalliques et supraconducteurs) aux températures cryogéniques, sous fort courant et sous champ magnétique, et de tester, dans leurs conditions nominales, des sous-ensembles cryogéniques complets (cryostats d'aimants, cryomodules…) ou leurs composants de base (masse froide de bobines, cavités RF, instrumentation…), dans des tailles allant de quelques millimètres à plusieurs mètres.

Des actions de R&D plus spécifiques sont menées sur les transferts thermiques à basse température (hélium II en milieu poreux, Pulsating Heat Pipe en azote, refroidissement par simple conduction), sur les écoulements diphasiques (thermosiphon en hélium I, en azote…) et sur la thermohydraulique lors de quench dans les aimants.

Le laboratoire compte, fin 2015, 15 ingénieurs dont 1 thésard et 13 techniciens.

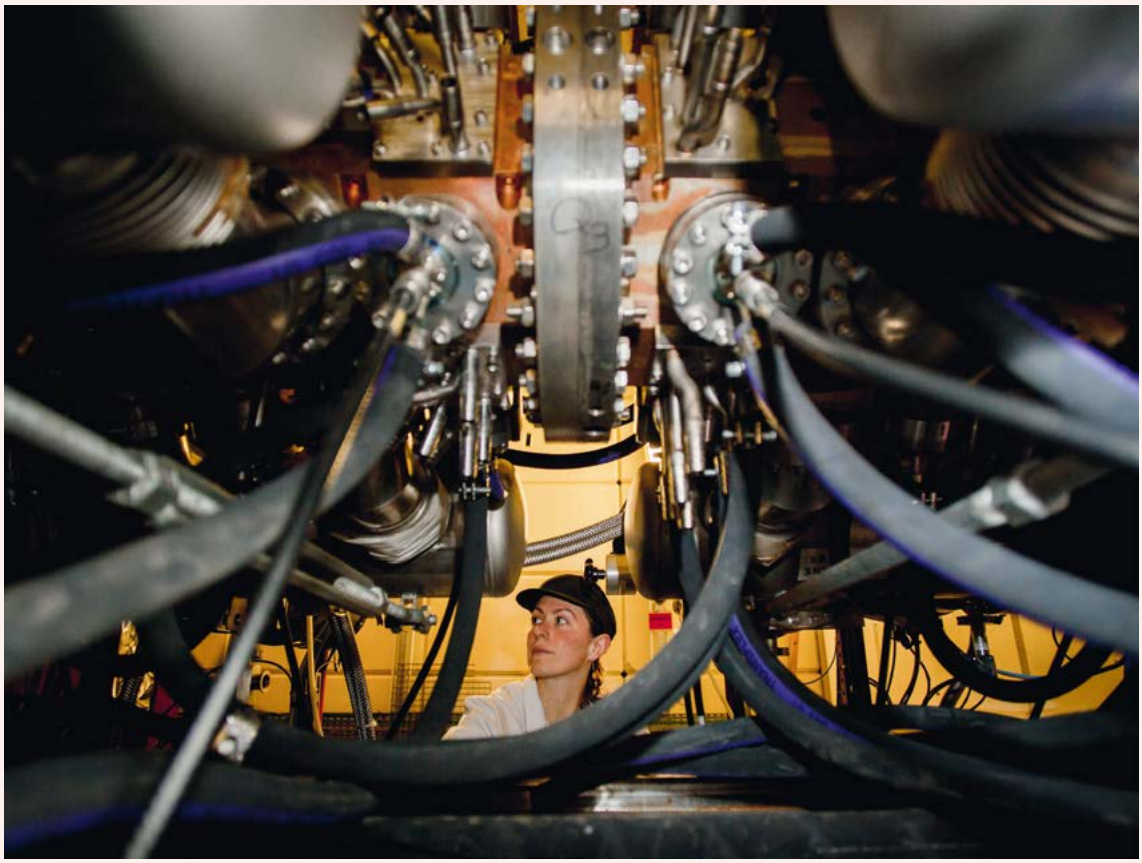


LABORATOIRE D'ÉTUDES DES AIMANTS SUPRACONDUCTEURS (LÉAS)

Chargé de répondre aux besoins des physiciens de l'Irfu dans le domaine des champs magnétiques, le **Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs** est constitué, fin 2015, de 7 techniciens, 20 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 spécifiques. Le contrôle des aimants est assuré en collaboration avec le 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.

Les grands projets terminés récemment, tels que le dipôle Glad du spectromètre pour R^3B, dont l'achèvement est prévu prochainement, où le solénoïde de l'imageur Iseult, permettent, en fonction de leurs besoins, de mener à bien la R&D qui maintient les compétences du Léas à leur meilleur niveau.
De plus, des besoins en forts champs magnétiques apparaissent aussi bien dans les laboratoires tels que le LNCMI (Laboratoire National des Champs Magnètiques Intances) de Grenoble ou en vue des futurs accélérateurs circulaires tels que FCC (Future Circular Collider) du Cern. Ces besoins ne peuvent être satisfaits qu'en utilisant le Niobium étain (Nb_3Sn), voire les supraconducteurs à haute température critique (HTS) à base de terre rares. Ces matériaux font l'objet d'une R&D active depuis quelques années.
Finalement, le di-borure de magnésium (MgB_2), qui pourrait à terme concurrencer économiquement le niobium titane (NbTi) fait lui aussi l'objet de développements importants.



LABORATOIRE D'ÉTUDES ET DE DÉVELOPPEMENTS POUR LES ACCÉLÉRATEURS (LÉDA)

Le **Laboratoire d'études et de développement pour les accélérateurs** regroupe les compétences du SACM en conception, réalisation et tests de systèmes de production, de transport, d'accélération et de caractérisation de faisceaux de particules chargées à haute intensité ou à haute énergie.

Constitué, au 31 décembre 2015, de 22 ingénieurs, 7 techniciens, 1 étudiant en thèse et 1 élève ingénieur en alternance, 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 les projets de sources de neutrons Ifmif et Saraf, dans la conception du quadripôle à radiofréquence pour le projet ESS, dans l'exploration des bases théoriques et des techniques de la prochaine génération d'accélérateurs de particules (HiLumi LHC, FCC, Clic), et dans l'étude de l'accélération laser-plasma (projet Cilex).

Dans la période 2013-2015, un important programme de R&D a été réalisé sur les sources d'ions grâce au développement de la source Alisés 2 et dans le domaine des diagnostics faisceau, avec le développement d'un émittancemètre innovant.

Durant cette période, le Léda a également développé ses plateformes technologiques par la réalisation du laboratoire DIagnostics, Vide, Assemblage (Diva), l'amélioration du Banc d'Étude et de Test des Sources d'Ions (Betsi) et la préparation du démarrage de l'Injecteur de Protons à Haute Intensité (Iphi). Ces développements ont été financés en partie par la région Ile-de-France.

LABORATOIRE D'INTÉGRATION ET DE DÉVELOPPEMENT DES CAVITÉS ET DES CRYOMODULES (LIDC2)

Le Laboratoire d'intégration et de développement des cavités et des cryomodules regroupe les compétences du SACM en recherche sur les cavités accélératrices supraconductrices et en 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 18 ingénieurs et 11 techniciens assurent au fonctionnement du laboratoire et aux avancées des projets.

LABORATOIRE D'INGÉNIERIE DES SYSTÈMES ACCÉLÉRATEURS ET DES HYPERFRÉQUENCES (LISAH)

Le Laboratoire d'ingénierie des systèmes accélérateurs et des hyperfréquences regroupe les compétences du SACM en conception et réalisation des structures électromagnétiques à haute fréquence et leur mise en œuvre avec une instrumentation appropriée. Il compte, fin 2015, 18 ingénieurs et 5 techniciens.

Les activités du laboratoire concernent principalement le développement des structures hyper-fréquence pour les accélérateurs de particules utilisés en physique (quadripôle à radiofréquence, cavités supraconductrice, coupleurs de puissance et d'évacuation des modes harmoniques supérieurs), ainsi que leurs outils de qualification (sources de puissance RF et leurs instrumentations associées). Il assure également la gestion de certains des moyens communs du SACM qui lui sont rattachés, à savoir les plateformes d'essais RF SupraTech-CryoHF et la nouvelle plateforme 352 MHz. Toutefois, ces activités peuvent également s'étendre à d'autres domaines d'application comme les antennes pour l'imagerie médicale par résonance magnétique à haut champ.

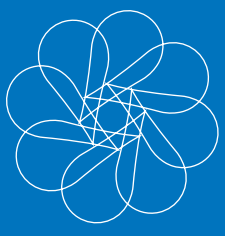
Dans ses missions, le LISAH s'appuie notamment sur des expertises internes à l'Irfu en sciences des matériaux, génie des procédés, construction mécanique et assurance qualité. Il met ses compétences au service des projets de l'Irfu, soit en prenant en charge la responsabilité d'un lot complet, soit en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

les ACTIVITÉS et PROGRAMMMES

SACM **2013-2015**

accélérateurs

cryogénie



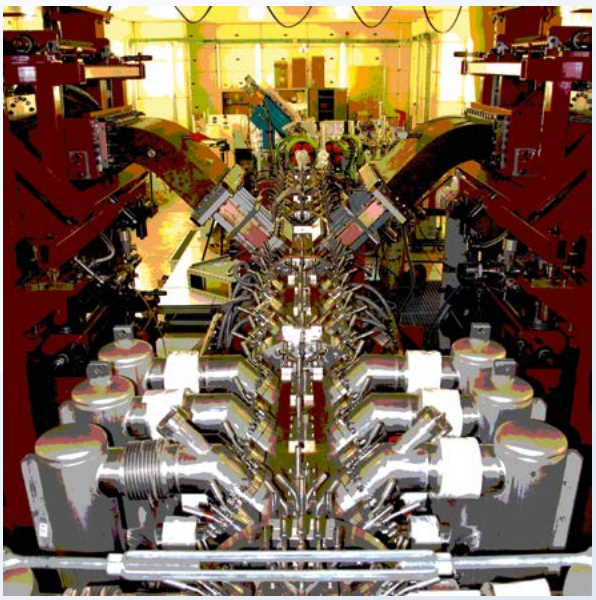
magnétisme

R&D
et développements
technologiques

les ACTIVITÉS et PROGRAMMMES

SACM **2013-2015**

accélérateurs



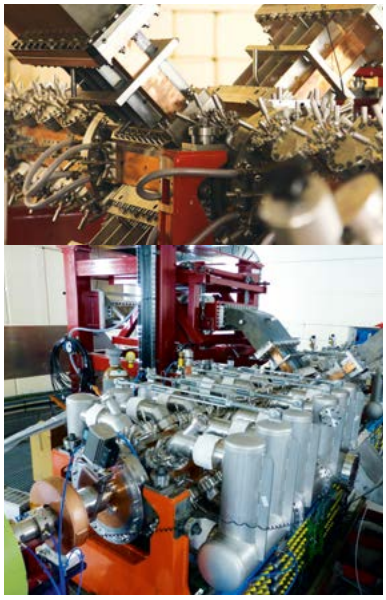
L'INJECTEUR DE PROTONS À HAUTE INTENSITÉ IPHI

Le projet IPHI est un prototype d'injecteur de protons accélérant un faisceau continu de 100 mA jusqu'à une énergie de 3 MeV. C'est une collaboration entre la DSM du CEA, l'IPN du CNRS et le Cern.

Cet injecteur se compose d'une source de protons (*Silhi : Source d'ions légers à haute intensité*), de sa ligne de transport à basse énergie (95 keV), d'une cavité accélératrice RFQ (*Radio frequency quadrupole*) portant l'énergie à 3 MeV et d'une ligne de diagnostics destinée à mesurer les caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ.

CONDITIONNEMENT DU RFQ

La cavité accélératrice RFQ est le cœur de l'injecteur, elle est constituée de six éléments – les tronçons – d'environ un mètre chacun. Cette cavité est excitée par une onde de radiofréquence (RF) de 352 MHz. Elle est capable en même temps de regrouper quasiment sans perte le faisceau continu issu de la source et de l'accélérer tout en le focalisant. Il faut surmonter de grandes difficultés technologiques de réalisation pour obtenir ces fonctionnalités exceptionnelles.
Suite à l'assemblage des six tronçons sur le support, les entrées RF (appelées ridges) ont été connectées. La phase de montage s'est ensuite finalisée par la mise en place du système de pompage et du système de refroidissement nécessaires au conditionnement.



Vue des entrées RF (guides d'ondes).

Le conditionnement consiste à injecter progressivement de la puissance RF au sein de la cavité. Au fur et à mesure des claquages, cette puissance augmente afin d'atteindre la valeur nominale de 1,2 MW. Le conditionnement du RFQ a commencé fin 2014. Environ 120 heures d'injection RF ont été effectuées avec un seul klystron, sans problème majeur (jusqu'à environ 120 kW crête/0,3 % cycle utile/f = 10 Hz). À la suite d'un arrêt permettant le montage du système de pompage définitif, le conditionnement a repris en 2015 et s'est poursuivi plus rapidement jusqu'à 800 kW de puissance crête mais a entraîné une modification des paramètres de fonctionnement. La conséquence fut une puissance réfléchie non nulle et non équilibrée, une perte de fréquence de résonance et une baisse de tension soit, un RFQ très dégradé. La décision a été prise de démonter les ridges pour analyser la situation.

DÉMONTAGE DES ENTRÉES RF

L'opération mécanique de démontage des ridges a été effectuée. Sur quatre « ridges » deux présentaient des joints RF endommagés altérant le contact RF, cause du dysfonctionnement.

Vue des ridges avant et après réparation.

L'analyse a mis en évidence une pénétration de la RF sur les côtés des « ridges » qui a fragilisé les extrémités du joint RF, jusqu'à le faire fondre.
Une solution technique utilisant un nouveau joint dans une gorge pré-usiné dans les ridges initiaux a permis de réutiliser ces derniers. À la suite de cette réparation, le RFQ a été remis sous vide et le conditionnement RF a repris sans encombre jusqu'à obtention de la loi de tension permettant l'accélération d'un premier faisceau.

LA LIGNE DE DIAGNOSTICS

La ligne de diagnostics assure le transport du faisceau de 300 kW jusqu'au bloc d'arrêt. La conduite du faisceau se fait

Status Report on the French High-intensity Proton Injector Project at Saclay (Iphi) Proceedings of Linac 2012, Tel-Aviv, Israël THPB031

CEA - CNRS - Cern

avec des éléments de focalisation (quadripôles) et des éléments de déviations (steerers). La ligne de diagnostics permet la caractérisation du faisceau en intensité, en énergie, en profil et en émittance. Une mesure de la dispersion d'énergie est possible grâce à l'utilisation d'un dipôle autorisant une déviation du faisceau. Cette mesure ne sera cependant possible que pour des puissances moyennes réduites du faisceau à 10 kW au maximum. Le design de la ligne et les diagnostics ont été réalisés par l'IPNO ; et le bloc d'arrêt de 300 kW a été quant à lui fabriqué au LPSC de Grenoble. Au cours de ces dernières années, l'équipe de l'IPNO a terminé l'installation des diagnostics et a optimisé la partie commande contrôle.

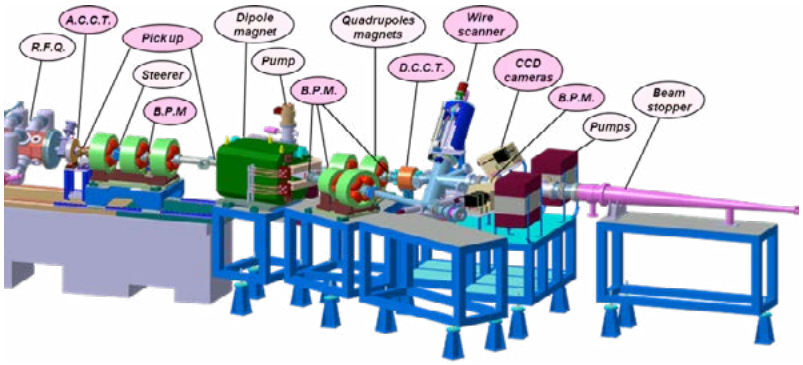
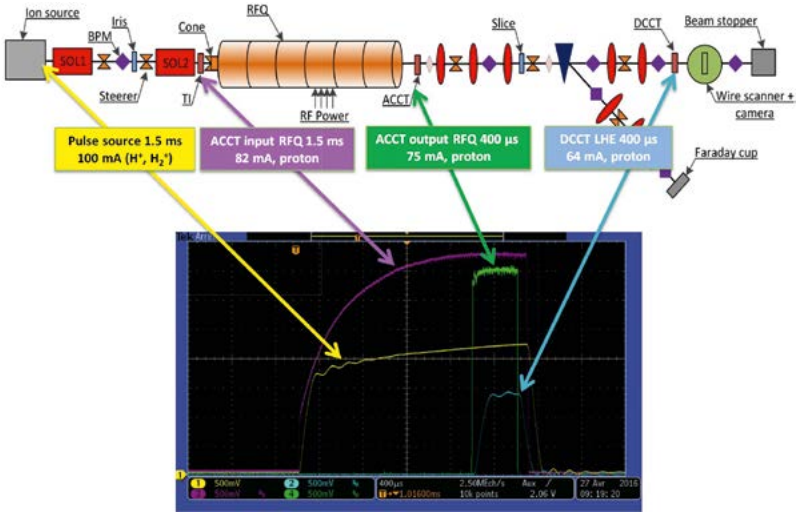


Schéma descriptif de la ligne de diagnostics.

PREMIER FAISCEAU

La source et le RFQ ont été réglés en mode pulsé de 1 à 1,6 ms pour la source, et de 200 à 400 µs pour la RF du RFQ au début de la mise en service. La durée d'impulsion RF du RFQ est optimisée pour accélérer la fin du faisceau issu de la source. La première partie du pulse source est donc rapidement perdue dans les premiers centimètres de la structure de la cavité RFQ. La fréquence de répétition a été réglée entre 1 Hz et 5 Hz suivant le type de mesure effectuée.
Ce mode de fonctionnement est, par hypothèse, proche d'un mode continu et devrait normalement produire des paramètres de réglage très similaires à ceux du mode continu.



Faisceau de 75 mA accéléré à 3 MeV avec une transmission du RFQ de 91%.

Cette installation, réalisée en commun avec les équipes de l'Irfu et de l'IPNO est remarquable pour sa fiabilité et sa reproductibilité de fonctionnement. Les premiers résultats expérimentaux commencent à confirmer les résultats des simulations. La suite du travail a pour objectif la production d'un faisceau de 100 mA en continu.

L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE À PROTONS DE FAIR

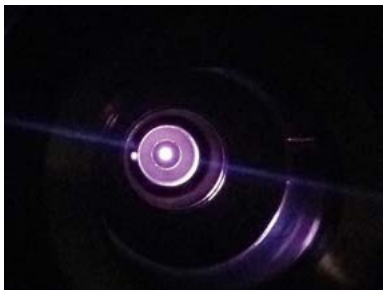
Le projet Facility for Antiproton and Ion Research (Fair) de GSI (*Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH*) rassemble autour d'une même installation plusieurs thématiques de physique : la physique des noyaux exotiques, la physique hadronique avec les collisions proton – antiproton, l'étude des réactions d'ions lourds relativistes (quelques dizaines de GeV par nucléon), la physique des plasmas et la physique atomique.

Vue aérienne du site Fair en construction.

LE PROTON LINAC

Dans le cadre de l'accord Franco-Allemand sur la participation à la construction des installations Fair, le SACM contribue plus particulièrement à l'accélérateur linéaire à protons (« Proton Linac ») par le développement et la réalisation de la source d'ions, de la ligne de transport à basse énergie (LBE), des aimants de la ligne à haute énergie et des *Beam Position Monitor* (BPM).

Le « Proton Linac » et les éléments associés fournis par le SACM appartiennent au premier étage d'une chaîne d'accélérateurs qui permet ensuite de créer les antiprotons par impact sur une cible.
Il accélérera un faisceau de protons à une énergie de 70 MeV. C'est un accélérateur chaud composé d'une source *Electron Cyclotron Resonance* (ECR) de protons, suivi d'une ligne basse énergie comportant deux solénoïdes, d'un Radio Fréquence Quadripôle (RFQ) et d'un *Drift Tube* Linac (DTL) à base de cavités *Cross-bar H-mode* (CH). À l'extrémité de l'accélérateur, un ensemble d'aimants assure la déviation du faisceau pour l'injection dans l'étage supérieur : le synchrotron SIS18. Il est composé de 2 dipôles à 45° et de 2 quadripôles.

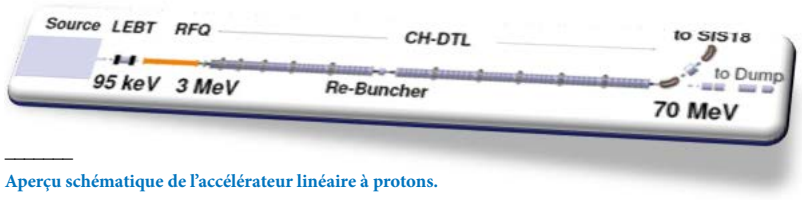


Émission radiale du plasma d'hydrogène.

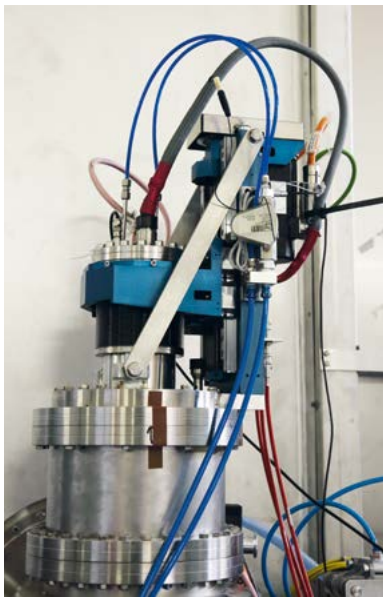
Le faisceau de 35 mA requis est pulsé à 4 Hz avec une longueur d'impulsion de 40 µs. Bien que le courant du faisceau injecté dans le synchrotron SIS18, soit limité à 35 mA, la conception de l'accélérateur linéaire de protons a été dimensionné pour un courant de 70 mA.
Sur toute la longueur de l'accélérateur, un ensemble de diagnostics est utilisé pour contrôler les propriétés du faisceau. En particulier, une série de 14 BPM permet l'alignement du faisceau ainsi que les mesures de l'intensité et de l'énergie le long de l'accélérateur linéaire.

La source de type ECR à 2,45 GHz doit délivrer un faisceau de 100 mA de protons (130 mA d'intensité maximum) à une énergie de 95 keV, en mode pulsé à une fréquence de 4 Hz. Afin d'injecter correctement le faisceau dans le RFQ, l'émittance doit être inférieure à 0,30 π.mm.mrad. Afin de satisfaire ce critère, une ligne basse énergie très compacte à base de deux solénoïdes intégrant des correcteurs dipolaires horizontaux et verticaux a été conçue pour limiter l'augmentation d'émittance due à la charge d'espace du faisceau. Avant l'injection dans le RFQ, un déviateur électrostatique (chopper) hache le faisceau de manière à créer des pulses très courts de quelques dizaines à quelques centaines de microsecondes. La longueur du pulse faisceau initial en sortie de la source est de l'ordre de 5 ms. Le faisceau dévié est collecté sur un cône en cuivre refroidi et recouvert d'une couche de 2 mm de tungstène assemblé par Compression Isostatique à Chaud (CIC). Ce cône a été réalisé en collaboration avec le Liten. Les paramètres du faisceau sont contrôlés au moyen de divers diagnostics positionnés entre les deux solénoïdes.

L'installation de l'ensemble de la source et de la ligne basse énergie jusqu'à la sortie du 2e solénoïde a débuté fin 2012 par la mise en place de la cage et de la



Aperçu schématique de l'accélérateur linéaire à protons.



Allison scanner.

plateforme haute tension, puis du système de refroidissement. L'ensemble a été mis sous vide et les tests haute tension ont été réalisés. La plateforme a pu ainsi être montée à 100 kV.
Au début du mois de novembre 2015, une étape importante a été franchie avec la production du premier plasma d'hydrogène dans la chambre d'ionisation avec une puissance injectée par le magnétron de 80 watts, pulsé à 4 Hz. Depuis les diagnostics faisceau sont en phase d'assemblage et de test.
Pour mesurer l'intensité du faisceau, 2 *Alternative-Current Current Transformers* (ACCT) ont été développés en étroite collaboration avec la société BERGOZ, puis ont été installés. Le premier est situé en sortie de source et le deuxième en sortie du deuxième solénoïde avant le chopper.

Nous avons développé, d'une part, en collaboration avec l'IPHC Strasbourg, l'Allison scanner pour mesurer l'émittance du faisceau ; et d'autre part, un filtre de Wien à base d'aimants permanents en structure de Halbach pour mesurer les différentes espèces (H^+, H_2^+, and H_3^+) présentes dans le faisceau. GSI fournira un profileur de faisceau à fils *Grid – Secondary emission Monitor* (SEM) horizontal et vertical (64x64 fils), ainsi qu'un système de fentes réglables pour contrôler la taille du faisceau ou limiter l'intensité.

LA MISE EN SERVICE DE L'INJECTEUR

Programmée en 3 phases, la mise en service a débutée en 2015 :
1) Le chopper est installé et la chambre diagnostics additionnelle est montée

Chambre chopper.

Filtre de Wien.

après la chambre chopper ; l'ensemble complet Source et LBE est caractérisé.
2) Montage de la chambre diagnostics additionnelle en sortie du tube accélérateur pour caractériser la source (intensité, proportions, émittance)
3) Ligne basse énergie sans la chambre chopper et le montage de la chambre diagnostics additionnelle en sortie du deuxième solénoïde ; Les diagnostics seront installés successivement entre les deux solénoïdes et après le deuxième solénoïde.
Diagnostics faisceau : BPM
L'ensemble des 14 moniteurs de position de faisceau nécessaires le long de l'accélérateur comporte 4 BPM situés en sortie des cavités accélératrices, les 10 autres étant situés dans les lignes de transport. Les calculs de radiofréquences et les calculs électromagnétiques ont été réalisés en collaboration avec GSI. Ils ont été réalisés pour différentes valeurs d'énergie, différentes longueurs de paquet, différents diamètres de bouton et de tube faisceau et différentes dimensions de bouton.

La conception d'un BPM bouton et du corps du BPM pour les sections à la sortie des cavités a abouti, courant 2015, à la réalisation mécanique d'un prototype. Le prototype mécanique se compose de 4 électrodes boutons de diamètre 14 mm montées sur un tube composé d'un cône afin de diminuer la propagation du champ électrique venant de la cavité. La conception et la réalisation d'un banc de test par l'Irfu a permis de mesurer et de qualifier ce BPM.

Un générateur envoie de manière continue un signal à une fréquence donnée (soit la fréquence de fonctionnement de l'accélérateur, soit à un de ses harmoniques) sur un fil passant à l'intérieur du BPM. Ce fil simule le faisceau. Pour un déplacement donné du BPM, la puissance reçue par chaque électrode est mesurée par des sondes de puissance. Le traitement informatique permet de caractériser la sensibilité, la linéarité, d'effectuer une carte de position, et de déterminer le centre électrique du BPM. Un banc de test a également été mis à disposition par l'IPN Orsay pour effectuer et comparer les différentes mesures. Un prototype de préamplificateur à 2 voies a également été conçu et réalisé pour l'amplification des signaux recueillis par les boutons.

Préamplificateur prototype.

BPM section inter-cavités.

Commissioning of the High Intensity Proton Injector of the Facility for Anti Proton and Ion Research at CEA-Saclay.
O. Delferrière, N. Chauvin, Y. Gauthier, P. Girardot, N. Misara, Y. Sauce, F. Senée, C. Simon, O. Tuske, T. Vacher.
Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, CEA/Saclay, DSM/Irfu, 91191-Gif/Yvette, France.
F. Ameil, R. Berezov, J. Fils. GSI, D-64291 Darmstadt, Germany.
Présenté à ECRIS2016

Contrat Irfu/GSI

IPHC de Strasbourg.

SPIRAL2

Le SACM est depuis 2004 un acteur majeur du projet Spiral2. Il a joué un rôle moteur durant l'avant-projet détaillé et il a installé et fait la mise au point de l'injecteur d'ions légers à Saclay en 2012. En parallèle le service a conçu et développé le quadripôle radiofréquence (RFQ) et les cryomodules à bas beta de l'accélérateur. L'ensemble de ces équipements est à présent livré et installé dans le tunnel de Spiral2 au Ganil. Ainsi, l'injecteur de protons et de deutons comprenant la source et les lignes faisceau de basse énergie a été mis en service au Ganil et a injecté ses premiers faisceaux au courant nominal dans le RFQ. Ce RFQ est à présent en phase de qualification.

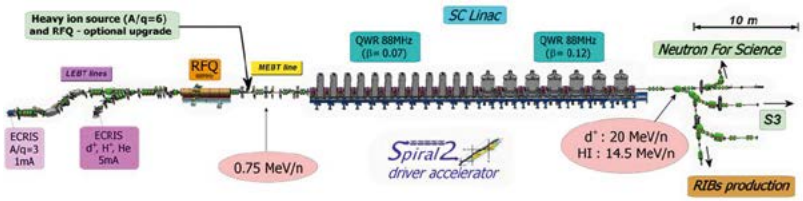


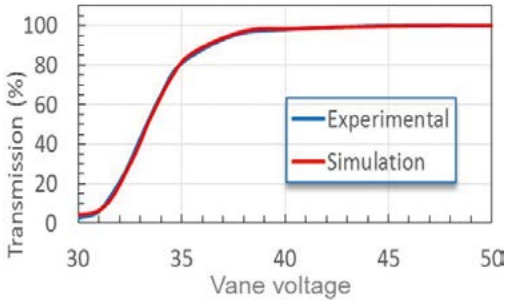
Schéma de l'accélérateur linéaire de Spiral2. Les faisceaux des sources d'ions lourds et protons/deutons sont injectés dans le RFQ, puis la LME (ligne moyenne énergie) met les faisceaux en forme pour être injectés et accélérés dans les cryomodules de type A puis B pour atteindre jusqu'à 40 MeV.

À l'issue de la période d'intégration, les faisceaux devraient finalement être injectés dans la suite de l'accélérateur composé des 2 familles de cavités supraconductrices de type quart d'onde. La mise en froid des 19 cryomodules (A et B) avec une mise en service de l'accélérateur de Spiral2 et des salles expérimentales (Phase 1 de Spiral2) est prévue pour 2017.

LE QUADRIPÔLE À RADIOFRÉQUENCE

Le quadripôle radiofréquence permet la mise en paquets du faisceau et la pré-accélération qui sont indispensables pour un transfert efficace dans les étages supérieurs tout en assurant le confinement des particules. L'Irfu avait en charge les études, la réalisation, le montage et la mise en service du RFQ de Spiral2 au Ganil. Ce RFQ est composée de 5 tronçons de cuivre de 1 m de longueur et d'un poids de 1,6 tonne, fabriqués séparément avec une précision de ±65 µm puis assemblés avec une précision d'alignement de ±10 µm. Les défauts géométriques incompressibles de fabrication ont été compensés par le réglage de 40 pistons à l'intérieur de la cavité, pour obtenir l'accord en fréquence et la loi de tension requise par la dynamique du faisceau. La puissance RF nécessaire au fonctionnement, est de 240 kW en continu. La thermalisation de la cavité est assurée par une circulation complexe d'eau à température régulée. La régulation du champ accélérateur est, quant à elle, assurée par un système d'asservissement conçu et fourni par l'Irfu. Ce système est également installé sur l'ensemble des cavités de l'accélérateur. La première mise en champ de la cavité a eu lieu le 15 novembre 2015 et a ensuite permis, le 3 décembre 2015, l'accélération du premier faisceau de protons à l'énergie nominal de 0,75 MeV (pour une tension de 50 kV). Dans les mois à venir, les tests de qualification du RFQ vont continuer jusqu'à permettre au RFQ d'atteindre sa tension nominale de 113 kV pour accélérer des ions de plus en plus lourds

Le RFQ Spiral2 dans le tunnel Spirla2 au Ganil.



Courbe de transmission du faisceau en fonction de la tension appliquée aux lames du RFQ. L'accord observé permet de valider d'une part le design géométrique des lames du RFQ et d'autre part les procédures complexes de réglage de la tension mises en œuvre par les équipes de l'Irfu. Elle apporte également une nouvelle preuve expérimentale de la précision et de la prédiction des codes de simulation développés au SACM.

LES CRYOMODULES À BAS BÉTA

L'accélérateur linéaire supraconducteur de Spiral2 comporte 2 familles de cryomodules contenant des cavités dont les géométries sont optimisées pour accélérer des particules à 7 % de la vitesse de la lumière (12 cryomodules A intégrant chacun une cavité à bas béta : $\beta = 0,07$, réalisés par l'Irfu) et à 12 % de la vitesse

Commissioning of the Spiral2 Deuteron Injector, D. Uriot, O. Tuske [CEA/DSM/Irfu, France] J.-L. Biarrotte [IPN, Orsay, France], IPAC 2013, Shanghai, China, THPWO005

Performances of Spiral2 Low and High Beta Cryomodules, C. Marchand, P. Bosland, G. Devanz, O. Piquet [CEA/Irfu, Gif-sur-Yvette, France] P.-E. Bernaudin, R. Ferdinand [Ganil, Caen, France] Y. Gomez (Y. Gómez Martínez) [LPSC, Grenoble Cedex, France] D. Longuevergne, G. Olry [IPN, Orsay, France], SRF 2015, Whistler, Canada, WEBA04

Irfu/Ganil/IPNO/LPSC/IPHC

Les 12 cryomodule de type A fournis par Irfu et installés dans le tunnel de l'accélérateur Spiral2.

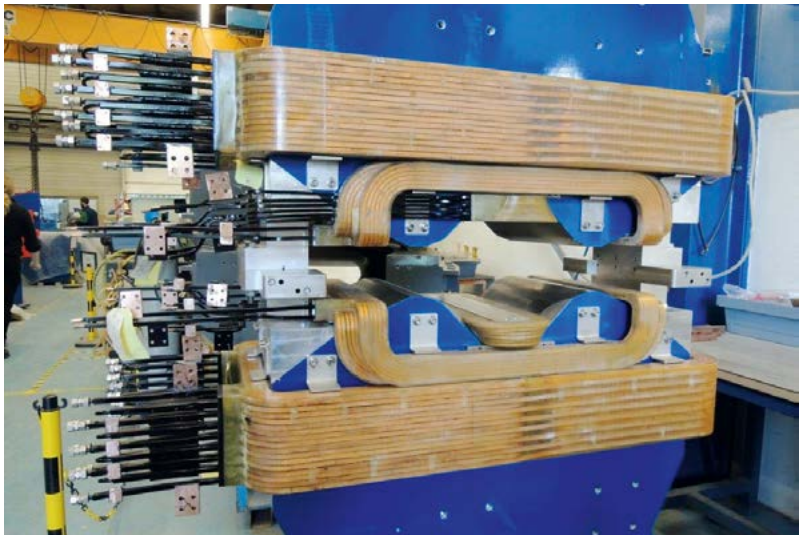
de la lumière (7 cryomodules B intégrant chacun deux cavités à haut béta : $\beta = 0,12$, réalisés par l'IPNO). Chaque cryomodule A contient une seule cavité en niobium massif qui est équipée d'un coupleur de puissance permettant d'injecter une puissance radiofréquence (RF) maximale de 10 kW en continu. Ces coupleurs sont fournis par le LPSC (Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie) de Grenoble. Des circuits cryogéniques associés à un écran thermique et des multicouches de super-isolation 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) et sur une grande amplitude (2 millimètres)

Les 4 derniers cryomodules de type A ont été assemblés dans la nouvelle salle blanche du bâtiment 124 Est à Saclay entre juin 2014 et juin 2015. L'ensemble des 12 cavités bas béta satisfait aux spécifications de champ accélérateur (supérieur à 6,5 mV/m) et de facteur de qualité Q0 (supérieur à $3,5x10^8$), et les pertes thermiques des cryomodules sont inférieures aux 21,5 W demandés par le Ganil. Les variations de fréquence des cavités soumises au système mécanique d'accord sont conformes aux prévisions, et l'hystérésis et la linéarité du système sont excellents.

Après une installation conjointe Irfu/Ganil du premier cryomodule sur le Linac pour transférer le savoir-faire, le Ganil a procédé seul à l'installation des 11 autres cryomodules A, avec le raccordement aux boîtes à vannes cryogéniques d'une part, et aux sections chaudes incluant les aimants de correction de trajectoire sous flux laminaire d'autre part. Les tests sous pression ont mis en évidence une fuite à chaud de l'ordre de 10^{-7} mbars.l/s sur le circuit hélium 4 K d'un cryomodule sous une pression de 1,5 bar. Cette fuite a été réparée après les investigations nécessaires. L'installation et le raccordement du dernier cryomodule de type A doit avoir lieu au mois de mai 2016.

LE SPECTROMÈTRE S³

Le spectromètre « Super Separator Spectrometer » (S³) bénéficiera des faisceaux d'ions lourds stables de très hautes intensités délivrées par l'accélérateur linéaire supraconducteur de Spiral2/Ganil. S³ permettra d'atteindre de très hautes transmission et résolution en masse avec l'utilisation d'aimants supraconducteurs de haute acceptance incluant des corrections sextupolaires et octupolaires. S³ inclut une cible rotative pour pouvoir accepter les hautes puissances déposées par le Linac, une structure optique à deux étages avec un « achromat » en moment, suivies d'un spectromètre de masse afin d'assurer la haute sélectivité des noyaux. Le premier étage sert à rejeter la plupart des noyaux parasites. Un triplet de multipôles ouverts, de technologie conventionnelle, permet l'évacuation et l'arrêt du faisceau primaire. Le SACM et le SIS contribuent à la conception, la réalisation et le suivi de fabrication du triplet de quadripôles ouvert intégrant des corrections hexapolaires, de la chambre à vide, et des blocs d'arrêts faisceau soumis à des dépôts de puissance élevés. Les mesures magnétiques effectuées sur chaque multipôle ont révélé un excellent accord avec les simulations réalisées au SACM lors de sa conception. Des expériences ont été réalisées sur le banc de test Betsi avec un faisceau de protons de 17 mA à 40 kV pour bombarder un prototype de doigt d'arrêt faisceau prévu à la sortie du triplet et pour observer la montée en température ainsi que l'impact sur le matériau. Cette campagne de mesure a permis de valider la conception des doigts avant le lancement en fabrication. La chambre à vide a été fabriquée et ses tolérances, très serrées, ont été respectées pour le montage à l'intérieur du triplet qui doit être réceptionné au Ganil au premier trimestre 2016. La mise en service de S³ est prévue en 2018 avec les premiers faisceaux de Spiral2.



Un des 3 multipôles de S3 chez le fabricant avant sa livraison.

SARAF : UN ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE « CLEF EN MAIN »

Le projet israélien Saraf (Soreq Applied Research Accelerator Facility) fournira une source intense de neutrons rapides et de noyaux radioactifs en vue d'explorer les réactions nucléaires rares et de produire des radionucléides pour la médecine nucléaire. Leur modération permettra aussi de produire suffisamment de neutrons pour réaliser les fonctions actuellement possibles seulement auprès de réacteurs nucléaires (la neutrographie, par exemple). Ces neutrons seront produits par l'interaction d'un faisceau de 5 mA de protons ou de deutons jusqu'à une énergie de 40 MeV avec plusieurs cibles spécifiques.

À partir de 2003, le SNRC (Soreq Nuclear Research Center) a construit et fait fonctionner la phase 1 de Saraf qui est constituée :

- D'une source de 5 mA continu de protons ou de deutons.
- D'une ligne basse énergie conduisant le faisceau jusqu'à l'entrée du RFQ.
- D'un RFQ 4-rod de 1,5 MeV/u d'énergie de sortie et
- D'un cryomodule prototype contenant 3 solénoïdes et 6 cavités supraconducteurs montant l'énergie du faisceau à quelques MeV.

En 2012, l'IAEC (Israel Atomic Energy Commission), qui finance ce projet, s'est adressé au CEA pour lui demander de fournir l'accélérateur linéaire (Linac) de la phase 2 destiné à monter l'énergie du faisceau jusqu'à 40 MeV.

Lors d'une phase d'avant-projet l'Irfu et le Ganil ont collaboré pour proposer d'abord une solution fortement inspirée du Linac à 88 MHz de Spiral2 actuellement en démarrage au Ganil, puis d'une autre solution à 176 MHz plus compatible avec les éléments de la phase 1 et inspirée de l'accélérateur d'Ifmif. Cette solution a fait l'objet d'un *System Design Report* (SDR) fin 2014 qui a servi de solution de base pour la signature d'un protocole d'accord entre l'IAEC et le CEA.

Le projet *Saraf-Linac*, piloté au SACM/LEDA, a ainsi démarré début 2015 et comprend l'étude (2015-2018), la réalisation (2018-2021), l'installation et le démarrage à SNRC (2021-2022) de la ligne moyenne énergie et des quatre cryomodules qui composent le Linac (pour une longueur totale de 25 m).

La ligne moyenne énergie d'une longueur de 5 m, permet principalement d'adapter au Linac supraconducteur le faisceau sortant d'une version modifiée du RFQ 4-rod de la phase 1. Elle contient 3 regroupeurs (cavités RF en cuivre), 8 quadripôles magnétiques, des diagnostics et des composants caractérisant et filtrant le faisceau.

L'accélérateurs supraconducteur est composé de 4 cryomodules de 5 m chacun. Les deux premiers, identiques, contiennent 6 blocs d'aimants et 6 cavités bas-béta supraconducteurs. Les deux suivants, identiques entre eux, contiennent 4 blocs d'aimants et 7 cavités haut-béta supraconducteurs.

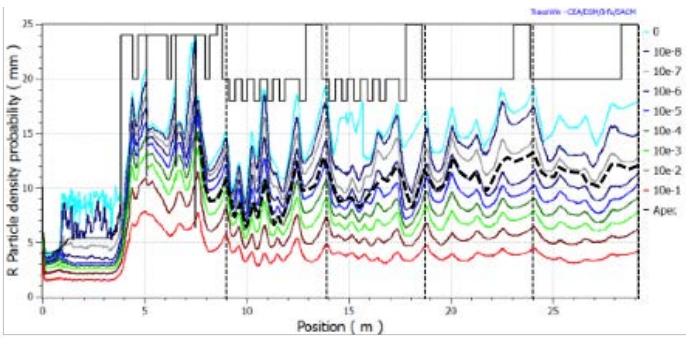
Des composants « majeurs », c'est-à-dire ceux portant un risque technique avéré, font l'objet d'une phase de prototypage (ou premier de série) jusqu'à début 2018 :

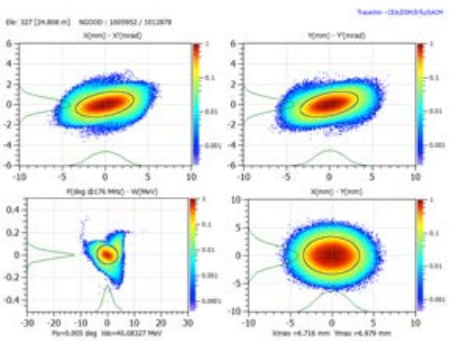
- Le regroupeur de la ligne moyenne énergie.
- Les deux cavités supraconductrices (bas et haut béta) et les coupleurs RF les alimentant.
- Le bloc d'aimants supraconducteurs.

Leurs fonctions et solutions techniques ont été figées lors du PDR (*Preliminary Design Review*) en octobre 2015. Leurs spécifications techniques seront figées lors de CDR (*Critical Design Review*) en juin 2016.

LA DYNAMIQUE DES FAISCEAUX

Le CEA est en charge de la simulation de la dynamique des faisceaux (protons et deutons, courant de 40 µA à 5 mA, énergie finale de 1,3 MeV/u à 40 MeV) dans tout le Linac (y compris le RFQ) en tenant compte des erreurs d'alignement et de champs statistiquement probables dans les composants. Les pertes doivent être maintenues en dessous de 1nA/m (2.10^{-7}) au-delà de 20 MeV.





N. Pichoff et al, "The Saraf-Linac Project Status", International Particle Accelarator Conference 2016, Busan, Korea

IAEC - Israël

Ganil-Caen, SNRC - Israël

Les spécifications techniques des cryomodules (encart 4) seront quant à elles figées fin 2017 pour faire place à environ 4 ans de fabrication, assemblage et tests à Saclay puis transport, installation et démarrage à SNRC. Le premier faisceau à pleine énergie est prévu pour mi-2022. Les 6 unités du SACM sont sollicitées sur le projet Saraf:

- Le LEDA est en charge du pilotage du projet et de la dynamique du faisceau (encart 1).
- La Dir est en charge de l'administration du projet.
- Le LISAH est en charge du développement des cavités supraconductrices (encart 2).
- Le LEAS est en charge du développement des aimants supraconducteurs (encart 3).
- Le LIDC2 est en charge du développement des cryomodules et des tests associés (encart 4).
- Le LCSE est en charge du test des aimants supraconducteurs et de la conception cryogénique.

Comme pour tous les projets d'accélérateur, le SIS est aussi largement sollicité sur ses expertises transverses que sont le contrôle-commande (LDISC et LEI), les études mécaniques (LCAP), les alimentations (LEIGE) et les suivis de fabrication (LRI). Les services de l'Irfu SEDI et SPhN contribuent eux aussi sur les détecteurs de pertes de faisceau.

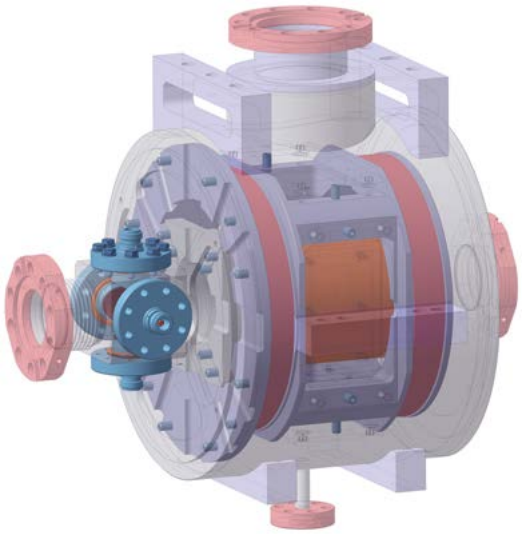
Le Ganil est quant à lui responsable des éléments de la ligne moyenne énergie (y compris les diagnostics du faisceau) et du pilotage du système (y compris le réglage et démarrage de la machine).

CAVITÉS SUPRACONDUCTRICES

Deux types de cavités supraconductrices 176 MHz sont utilisés:
- Les 12 premières sont adaptées à une vitesse réduite de faisceau $\beta = 0{,}091$, de longueur 280 mm et de champ accélérateur maximal 6,5 MV/m.
- 14 sont adaptées à $\beta = 0{,}181$, de longueur 420 mm et de champ accélérateur maximal 7,5 MV/m.

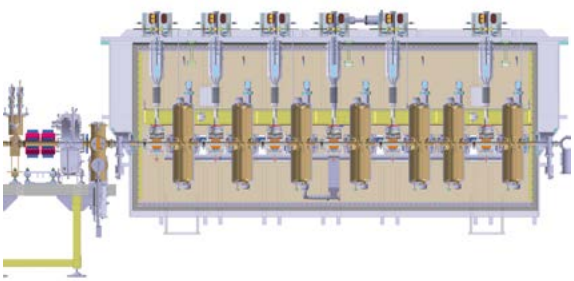
AIMANTS SUPRACONDUCTEUR

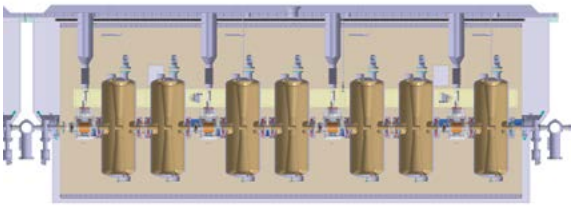
Cinq bobines supraconductrices constituent l'aimant :
- Un solénoïde principal produisant un champ maximal sur l'axe de 6,4 T.
- Deux solénoïdes de part et d'autre réduisant le champ de fuite sur les cavités.
- Deux paires de bobines de déviation horizontale et verticale insérées entre les deux solénoïdes précédents.



CRYOMODULES

Les 4 cryomodules, de 5 m de longueur, doivent maintenir en conditions opérationnelles les cavités et les aimants, c'est-à-dire :
- En transmettant l'énergie nécessaire à leurs fonctionnements par les amenées de courant et les coupleurs de puissance RF associés.
- En les conservant à une température constante de 4,45 K par l'apport d'hélium liquide et l'évacuation d'hélium gazeux.
- En les maintenant à +/- 1 mm autour de l'axe faisceau malgré les déplacements associés à la mise sous vide et aux contractions thermiques.





IFMIF (INTERNATIONAL FUSION MATERIALS IRRADIATION FACILITY)

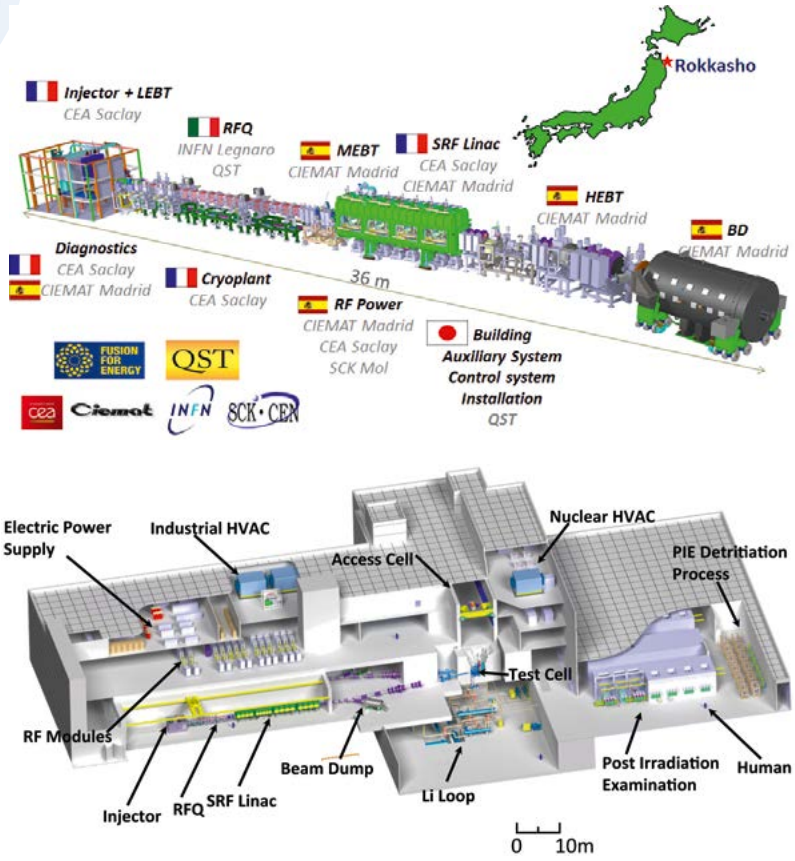
PHASE EVEDA (ENGINEERING VALIDATION AND ENGINEERING DESIGN ACTIVITIES)

Le projet Ifmif/Eveda est défini par l'accord de l'Approche Élargie établi entre Euratom et le gouvernement Japonais. La coordination est partagée entre l'Europe (F4E) et le Japon (QST ex JAEA) et les principaux partenaires européens sont la France, l'Italie, l'Espagne et l'Allemagne. Deux types d'activités y sont menées :

- L'étude de l'infrastructure complète Ifmif, source intense de neutrons dont le spectre en énergie est similaire à celui des réacteurs à fusion permettant d'évaluer le comportement des matériaux sous très fort flux de radiation de neutrons et de qualifier certains d'entre eux en vue de la conception, de la construction et du fonctionnement sûr du démonstrateur de fusion Demo.
- La qualification des systèmes critiques qui la composent à savoir la tête de l'accélérateur jusqu'à 9 MeV, la cible Lithium à l'échelle 1/3, et les modules instrumentés des cellules d'irradiation. L'enjeu est de taille, puisque Ifmif est considéré comme incontournable pour finaliser les études de l'usine de production d'électricité basée sur la fusion (Demo) et d'en permettre le démarrage.

Pour des raisons historiques et stratégiques, le CEA est un acteur important de l'étude et de la validation de l'accélérateur Ifmif auxquels collaborent également INFN-Legnaro, SCK-CEN, Ciemat et QST (ex JAEA). L'accélérateur qui regroupe deux linacs de 40 MeV doit délivrer un faisceau de Deutons de 10 MW, ce qui en fait une machine aux performances jamais atteintes. Pour démontrer sa faisabilité, un prototype composé d'un seul linac de 9 MeV et 125 mA, qui projette le faisceau de Deutons de plus de 1 MW sur un bloc d'arrêt, est en cours d'installation sur le site japonais de Rokkasho.

Le SACM a la responsabilité technique de l'ensemble du projet Ifmif/Eveda. Il a la charge de l'Injecteur de deutons, du SRF-Linac, de l'installation cryogénique, des amplificateurs du Système RF, les lots Diagnostics pour le faisceau et système de Contrôle/Commande étant respectivement à la charge du Sedi et du SIS. Le SACM avec le support des autres services de l'Irfu a également un apport important en expertise (sécurité, dynamique faisceau), participe à l'installation et à la mise en service de l'accélérateur prototype au Japon et contribue aux études de conception d'Ifmif.



En haut : LIPAC equipment contributions. Ci-dessus : IFMIF plant new Mukesh 2016.

Au terme de 5 années d'études, le dossier détaillé d'ingénierie du complexe Ifmif pour chacune des phases de construction, opération et démantèlement a été livré en 2013, incluant les éléments calendrier et coûts associés. Le SACM et l'Irfu ont eu en charge les dossiers de plusieurs systèmes de l'accélérateur (injecteur, SRF Linac, ligne haute énergie, diagnostics, système cryogénique, auxiliaires), la coordination de dossiers transverses tels que la dynamique de faisceau, les systèmes de vide, l'alignement, le refroidissement, le système de contrôle, et également la participation à l'évaluation des coûts de l'infrastructure Ifmif.

SRF LINAC

En mai 2008, le comité international de pilotage de l'Approche Élargie a validé la solution basée sur les cavités supraconductrices comme référence pour l'accélérateur prototype LIPAc développé dans le cadre de Ifmif/Eveda. Aucun accélérateur supraconducteur de basse énergie (<40 MeV) en projet ou en construction ne vise un courant d'ions légers d'une telle intensité (125 mA de D+). Le développement d'un tel système est essentiel pour Ifmif et les projets clones tels que DONES qui seront équipés de plusieurs cryomodules à cavités supraconductrices.

Les études de conception, la réalisation des composants et leur qualification sont sous la responsabilité du CEA-Saclay assisté du Ciemat-Madrid. Le SACM, avec le support du SIS, est en charge de la fourniture de presque tous les composants du cryomodule, en particulier ses huit cavités supraconductrices HWR, coupleurs de puissance RF et systèmes d'accord en fréquence, ainsi que de certains systèmes conventionnels tels que les systèmes de vide, d'alignement et de contrôle.

Le CEA doit également effectuer les tests de qualification des composants critiques dont il a la charge. Comme aucune cavité supraconductrice HWR n'a jamais été alimentée au niveau de puissance visé dans ce projet, le CEA a développé un banc de test dédié (SATHORI) permettant un test

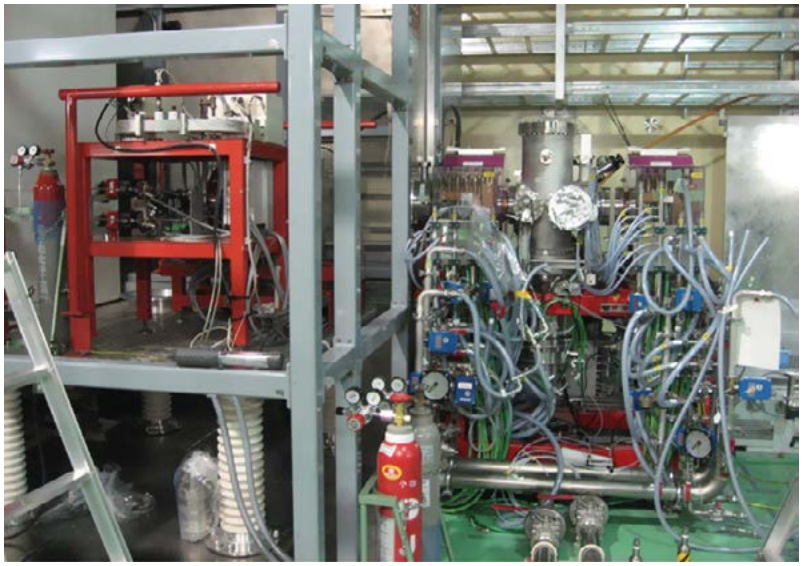
en puissance des HWR avec leur coupleur et leur système de réglage en fréquence. Sur la période 2013-2015, les coupleurs prototypes ont été qualifiés, l'approbation du design et du plan d'inspection de la cavité supraconductrice dans la rubrique des enceintes sous pression a été délivrée par l'agence de certification japonaise (KHK), la plupart des composants du cryomodule (cavités, système d'accord, coupleurs, enceinte à vide, écran thermique, cadre support) ont été lancés en fabrication, et l'installation du banc de test Sathori a débuté.
Ces composants seront assemblés sous forme de cryomodule au 1er semestrre 2018, sous la responsabilité de F4E et avec l'assistance du CEA, dans une infrastructure incluant une salle blanche en construction sur le site de Rokkasho. L'installation et le raccordement à l'accélérateur prototype sont prévus en 2018.

USINE CRYOGÉNIQUE

Pour refroidir le Cryomodule de l'accélérateur prototype Ifmif/Eveda, le SACM est en charge de livrer et installer une usine cryogénique sur le site de Rokkasho. Après plusieurs appels d'offre infructueux, l'usine cryogénique a été décomposée en deux lots: cryo-production (puissance cryogénique et contrôle-commande) et cryo-distribution (équipements spécifiques et installation sur site). En plus de la flexibilité exigée pour le fonctionnement spécial des deux boucles refroidissant respectivement les solénoïdes et les cavités, les défis de l'usine cryogénique sont les suivants : Faible pression dans les cavités avec un bain régulé à 250 mbar relatifs et une pression maximale inférieure à 500 mbars relatifs ; Boite à Vannes sous irradiation nécessitant des matériaux spécifiques ; Cadre réglementaire HPGSL (Japon) ou ASME avec des demandes spécifiques et une limitation à 10 bars relatifs ; Installation au Japon ; Mise en service et tests de réception en l'absence du Cryomodule ; Branchement au Cryomodule par simple connexion de brides avec précision de positionnement compatible avec l'alignement du cryomodule sur l'accélérateur.
L'usine cryogénique comprend un réfrigérateur-liquéfacteur fournissant un peu plus de 100 W et 50 l/h simultanément, bénéficiant d'azote liquide pour son pré-refroidissement mais sans système de récupération d'hélium. L'usine est conçue pour fonctionner sans discontinuer, c'est pourquoi le compresseur est équipé d'un variateur de fréquence s'adaptant aux différents régimes de fonctionnement. La mise en froid se fait par de l'hélium liquide extrait d'un Dewar 2 000 l. Air Liquide a été retenu pour la fabrication du lot Cryo-production dont les tests de qualification ont débuté fin 2015. Le contrat pour le lot Cryo-distribution a également été ensuite attribué à Alat. L'ensemble des composants seront livrés en 2016, les essais et démarrage de l'ensemble étant prévus pour le 1er trimestre 2017.

INSTALLATION ET MISE EN SERVICE

L'installation et la mise en service de l'accélérateur prototype LIPAc sont effectuées sur le site de Rokkasho dans le cadre d'un accord spécifique. Cette phase a débuté en 2013 après la livraison de l'Injecteur. Ces activités sont effectuées par des experts de la collaboration et le SACM contribue à hauteur d'environ 10 hommes.ans pour l'installation et la mise en service de l'Injecteur et du SRF-Linac. La préparation et le démarrage de l'installation cryogénique, s'effectue sous forme de missions de longues durées pour l'optimisation de l'opération de l'accélérateur. Le CEA est le principal contributeur européen.
L'installation et la mise en service s'effectuent par phases : Phase A – 100 keV (Injecteur), Phase B - 5 MeV (RFQ et MEBT), Phase C – 9 MeV (SRF-Linac et HEBT). Les phases B et C s'effectuent en pulsé pour limiter l'activation de l'accélérateur et sont suivies d'une phase D durant laquelle le cycle utile sera progressivement augmenté jusqu'à 100 %.
En 2013, l'injecteur a été réalisé et testé à Saclay puis entièrement démonté et transféré sur le site de Rokkasho. Le remontage a effectivement commencé en mars 2014, une fois les contrôles préliminaires et le conditionnement effectués, le premier plasma a été obtenu en octobre 2014. C'est le 4 novembre 2014, après le conditionnement à haute tension du système d'extraction, qu'un premier faisceau d'ions hydrogène de 40 mA (H+ et autres ions moléculaires) a été extrait à 70 kV. Après deux jours de réglage, le courant d'ions total extrait a atteint 100 mA avec une énergie de 100 keV. La mise en service sur site s'est poursuivie en décembre 2014 après les tests de fonctionnement des différents diagnostics fournis par le SACM. Ensuite, le premier faisceau de deutons a été produit en juillet 2015. La mise en service de l'injecteur s'est achevé fin 2015 avec l'obtention d'un faisceau record de D+ en fin de ligne basse énergie de 112 mA dans une émittance de 0,25 pi.mm.mrad. Si la phase B d'augmentation de l'énergie jusqu'à 5 MeV qui débutera en avril 2016 concerne surtout l'INFN, le SACM et les services associés de l'Irfu, seront à nouveau très sollicités dès 2017 pour préparer l'assemblage du cryomodule, pour l'installation du SRF-Linac, son raccordement au cryoplant et le démarrage de l'ensemble. Grâce à cette phase qui s'achèvera une fois que les performances nominales de l'accélérateur complet seront atteintes, au plus tard en décembre 2019, l'Irfu confortera son avance technique dans le domaine des accélérateurs de protons et de deutons de très forte intensité.



The European–Japanese efforts under the Broader Approach agreement towards a Li(d,xn) neutron source: Current status and future options, J. Knaster et al., Nuclear Materials and Energy (2016), http://dx.doi.org/10.1016/j.nme.2016.04.012

Fusion Science and Technology, P. Bayetti et al., Overview of CEA contributions to the Broader Approach projects, Fusion Science and Technology vol. 64 nov. 2013

Agreement between the Government of Japan and the European Atomic Energy Community for the joint implementation of the Broader Approach activities in the field of fusion energy research

Ciemat, INFN, SCK

LA SOURCE EUROPÉENNE DE SPALLATION ESS

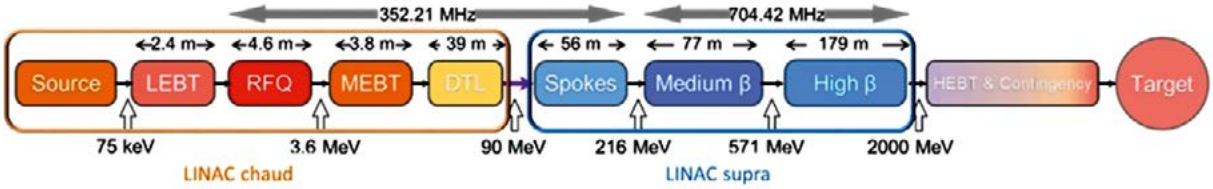


Schéma de l'accélérateur ESS.

ESS est la future Source de Spallation Européenne en construction à Lund (Suède) qui démarrera en 2019 et sera pleinement opérationnelle en 2025. Elle délivrera des neutrons produits par spallation, réaction nucléaire résultant de l'irradiation d'une cible de tungstène par un faisceau de protons intense et de haute énergie lui-même produit par un accélérateur de particules linéaire et supraconducteur (Linac supra). La source ESS sera pulsée à 14 Hz avec un cycle utile de 4 % et une longueur de pulse de 2,86 ms. De par ses performances techniques, ESS fournira le faisceau de neutrons de plus haute brillance[1] produit par ce type de sources. Les applications d'ESS concerneront la recherche sur la matière dans les domaines de l'énergie, des télécommunications, de la fabrication, des transports, des technologies de l'information, de la santé et des biotechnologies.

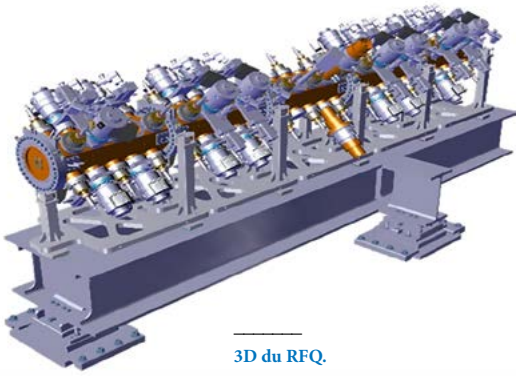
L'accélérateur linéaire comprend, entre autres, dans sa section basse énergie (E ≤ 90 MeV) un RFQ (Radio Frequency Quadrupole) et un DTL (Drift Tube Linac), et sa section haute énergie est composée de cavités supraconductrices permettant d'accélérer les protons jusqu'à 2 GeV. Il y a trois familles de cavités supraconductrices : une première famille de cavités spoke à 352 MHz optimisées pour des faisceaux de protons à 50 % de la vitesse de la lumière (β= v/c = 0,50) pour les énergies comprises entre 90 MeV et 216 MeV, et ensuite 2 familles de cavités elliptiques à 704 MHz ; les premières dites medium beta (β= 0,67) pour les énergies comprises entre 216 MeV et 571 MeV, et les secondes dites haut beta (β= 0,86) pour les énergies comprises entre 571 MeV et 2,0 GeV.

En 2009, au lancement du projet, L'Irfu a été l'un des premiers partenaires de la collaboration et a contribué à la conception des composants majeurs de l'accélérateur tels que le RFQ et les 2 sections des cryomodules medium et haut beta ci-dessus. Ces activités commencées au cours de la phase de design de l'accélérateur dite ADU (Accelerator Design Update) se sont déroulées dans le cadre d'un accord de collaboration Franco-Suédois signé par le CEA et le CNRS.
La phase de réalisation d'ESS démarre en janvier 2013.
Les activités de prototypage débutées pendant la phase ADU ont continué durant la période 2013-2015, et en parallèle a été préparée la contribution en nature de la France à l'accélérateur d'ESS. À la fin 2015 la contribution de l'Irfu couvre environ 70 % de la longueur du Linac avec la fourniture du RFQ et des 30 cryomodules medium et haut beta en plus de certains diagnostics du faisceau (profil, intensité) et d'éléments du Contrôle Système.

Certaines de ces nouvelles activités de la contribution en nature considérées comme urgentes ont démarré avant la signature de l'accord dans le cadre d'accords dits « Head of Agreement » (HoA). C'est le cas de 2 diagnostics de la ligne faisceau basse énergie, (mesures de fraction d'espèces par effet Doppler et mesures d'emittance), du système de contrôle de la ligne faisceau de basse énergie, de la commande du cuivre pour la réalisation du RFQ et d'un deuxième cryomodule prototype à cavités haut beta.
Le démarrage et le déroulement des activités de la contribution ont pu se faire sans contrainte majeure avant la signature de l'accord de la contribution en nature qui a été reportée à l'année 2016.

Le système de contrôle de la source de protons et de la ligne faisceau de basse énergie (LEBT) est développé par le SIS/Irfu. Il concerne aussi les diagnostics faisceau installés sur la LEBT qui sont développés au SACM (Doppler Shift Measurements et EMU).
L'EMU (Emittance Measurement Unit) permet de mesurer la divergence angulaire et l'intensité du faisceau en sortie de la source d'ions dans les deux dimensions transverses à l'axe faisceau (x,x') et (y,y').
Le SACM est chargé d'étudier, réaliser et livrer 2 systèmes Allison scanners pour les mesures dans chacune des directions.
Un des challenges de ces systèmes est lié à la très forte densité de puissance déposée au niveau des fentes qui interceptent le faisceau de protons. Des difficultés de réalisation de ces pièces en tungstène ont conduit à un report de la livraison prévue maintenant en novembre 2016.

[1] Brillance : flux de neutrons par émittance et par bande passante (en angströms), unité : nombre de neutrons/s/sr/Å.



3D du RFQ.

Le Doppler Shift Measurement Unit permet de mesurer les fractions d'espèces présentes dans le faisceau en sortie de la source d'ions par l'analyse du rayonnement d'interaction du faisceau (et donc de ces dites espèces) avec le gaz résiduel régnant dans la chambre à vide du faisceau. Le CEA est chargé de livrer un ensemble Doppler (livraison effectuée en juillet 2016).
D'autres diagnostics développés à l'Irfu, le Non Invasive Profile monitor (NPN) et le neutron sensitive Beam Loss Monitors (nBLM), sont sous la responsabilité du SEDI/Irfu.

LE RFQ

Le RFQ 3D ci-dessus est la première cavité accélératrice de la section chaude (à température ambiente ?) du Linac (partie à basse énergie non supraconductrice). Le faisceau de protons continu y est injecté à une énergie de 75 keV et sort du RFQ à une énergie de 3,6 MeV transformé en paquets à la fréquence de 352 MHz.
Ces paramètres faisceau ont été figés par ESS lors de la phase de redéfinition de l'accélérateur au cours de l'année 2013. Ces changements nous ont conduit à étudier une nouvelle conception du RFQ afin de satisfaire aux nouvelles caractéristiques de l'accélérateur. Cette dernière conception est la 3e effectué par le SACM suite aux modifications des paramètres faisceau d'ESS. Une première revue Critical Design Review (CDR-1) a eu lieu le 18 novembre 2014 à la suite de laquelle ESS a donné son accord pour que le CEA commande le cuivre nécessaire à la fabrication du RFQ. Le cuivre a été livré début 2016. Une deuxième revue CDR-2 a eu lieu en décembre 2015 et a figé la conception détaillée et les interfaces du RFQ ce qui a permis de lancer les appels d'offres pour la fabrication du RFQ au début de l'année 2016.

LES CRYOMODULES À CAVITÉS ELLIPTIQUES

En aval du RFQ, le faisceau est accéléré par d'autres cavités adaptées à la célérité croissante des particules qui évolue le long du LINAC. Les 30 cryomodules à cavités elliptiques, 9 medium beta et 21 haut beta, sont les contributions les plus importantes de l'Irfu. Celles-ci couvrent l'ensemble des activités de conception, prototypage (2 cryomodules, un à moyen et un à haut betas seront réalisés et testés à Saclay) ainsi que la fourniture des composants de la série (à l'exception des cavités supraconductrices), l'assemblage des 30 cryomodules et les tests en puissance des premiers cryomodules assemblés. Les cryomodules de 6,6 m de long abritent 4 cavités supraconductrices fonctionnant à 2 K, chacune étant alimentée par un coupleur de puissance RF transmettant jusqu'à 1,1 MW de puissance pic. Chaque cavité à moyen et haut betas pourra respectivement fournir une tension accélératrice de 14,3 mV et 18,2 MV. Les études mécaniques du cryostat ont été effectuées en collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. L'assemblage des 30 cryomodules ESS, qui débutera à la fin 2017, s'inscrira dans la continuité des cryomodules fabriqués pour le projet XFEL et bénéficiera de l'expérience acquise et des infrastructures libérées par XFEL en 2016.

CRYOMODULE PROTOTYPE MEDIUM BETA M-ECCTD

Les études mécaniques d'un cryomodule prototype à cavités medium beta M-ECCTD ont commencé à la fin de l'année 2012 en collaboration avec l'IPNO qui est en charge du design et de l'approvisionnement des composants du cryostat. L'Irfu est en charge des cavités, des coupleurs, du système d'accord en fréquence, du blindage magnétique, des outillages d'assemblage, de l'assemblage du cryomodule, de l'installation de la zone de tests en puissance RF et des tests proprement dits dans nos installations.
Le design des cavités medium beta a commencé en septembre 2013 après que la valeur de β= 0.67 pour ces cavités medium beta a été fixée par ESS. Ce design a été effectué en collaboration avec un étudiant de l'Université de Lund. Plusieurs itérations d'optimisation du design RF de ces cavités ont été nécessaires afin de réduire les risques liés à certains modes résonnants d'ordre supérieur (Higher Order Modes HOMs). La plupart des composants ont été commandés au cours de l'année 2015 et les premières livraisons ont commencé en 2016 ; cavités coupleurs de puissance, composants du cryostat du cryomodule, lignes cryogéniques et lignes RF du bunker de tests.

Accord Franco-Suédois pour la période 2010-2016, Contribution en nature de la France à la construction de l'accélérateur d'ESS

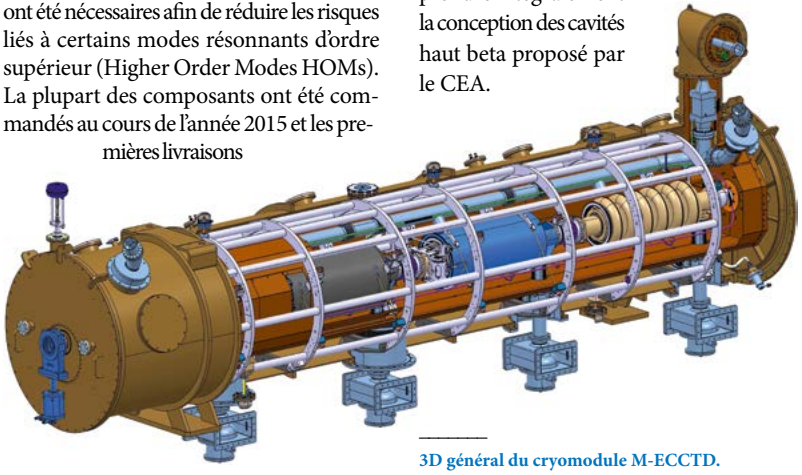
INFN (Italie), STFC Daresbury (UK), Université d'Upsala (Suède)

CRYOMODULE PROTOTYPE HAUT BETA H-ECCTD

Un deuxième cryomodule prototype fait partie de la contribution en nature. Celui-ci sera très similaire au M-ECCTD et intègrera des cavités à haut beta dont la conception et les études mécaniques ont été entièrement réalisés à l'Irfu. 2 cavités prototypes haut beta ont été réalisées et testées sur la période 2013-2015. Les tests RF ont été couronnés de succès et les cavités répondent aux spécifications d'ESS. L'appel d'offres de 5 cavités pour le cryomodule H-ECCTD a été préparé en 2015 et lancé début 2016.

CRYOMODULES DE SÉRIE

Sur la période 2013-2015 nous avons mis en place l'équipe projet de l'Irfu et établi la collaboration avec les partenaires d'ESS en vue de la production des cryomodules de série. Le LASA (INFN de Milan) est en charge de la production de la série des 36 cavités medium beta, et STFC (Daresbury-UK) de celle des 84 cavités haut beta. Le LASA propose un changement de design RF et mécanique des cavités medium beta par rapport à celui proposé par le CEA. Le plan de développement du cryomodule M-ECCTD devra être en conséquence lui aussi modifié pour intégrer une cavité LASA dans ce cryomodule prototype afin de la qualifier en configuration définitive avant le lancement de la production de série.
Le STFC a choisi de reprendre intégralement la conception des cavités haut beta proposé par le CEA.



3D général du cryomodule M-ECCTD.

L'ASSEMBLAGE DES CRYOMODULES XFEL

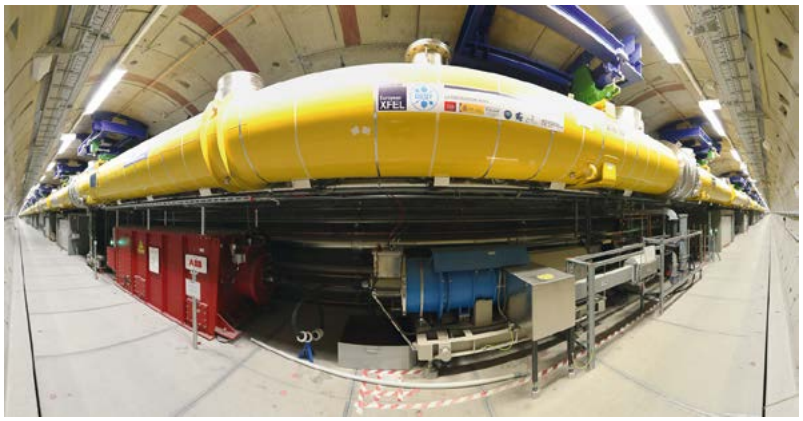
Le projet *European-XFEL* est une source de lumière dite de 4e génération qui produira des flash-laser extrêmement brillants (~ 10^{33} photons/s/mm²/mrad²) et ultra-courts (~10-100 fs) de rayons X jusqu'à 0,5 Å de longueur d'onde. Le but est de micro-photographier des structures et des processus physiques, chimiques ou biologiques afin d'en révéler la cinétique grâce à une exposition lumineuse jamais atteinte.

À la base de cet instrument se trouve un accélérateur linéaire supraconducteur à électrons de 17,5 GeV et 1,9 km de long ci-dessous dont la construction est prise en charge par un consortium d'instituts européens, basés principalement en Allemagne (Desy), France (CEA, IN2P3), Italie (INFN), Espagne (Ciemat), Suisse (PSI), Pologne (NCBJ) et Russie (BINP). Sa mise en service est prévue en 2016 et la fourniture des premiers faisceaux aux utilisateurs en 2017.

Cet accélérateur utilisera 101 cryomodules identiques (photo ci-contre), de 12 m de long, intégrant un train de 8 cavités RF supraconductrices (1,3 GHz) suivies d'un quadripôle et d'un moniteur de position, refroidi à l'Hélium liquide à 2 K. Un ensemble de 3 cryomodules de pré-séries et de 100 cryomodules de séries sont assemblés à Saclay sous la responsabilité du CEA par l'opérateur industriel Alsyom sur le plateau technique, appelé 'Village XFEL', composé d'une chaîne de 7 stations de montage successives, pour la plupart doublées (illustrations ci-après). Pour contenir la construction de l'accélérateur dans une durée de l'ordre de 3 ans, Desy, le CEA et les autres laboratoires fournisseurs de composants de l'accélérateur ont fixé à un cryomodule par semaine la cadence de réalisation tout au long de la chaîne de production, de la fabrication des composants jusqu'à l'installation dans le tunnel, en passant par l'intégration à Saclay et les tests à Desy. Afin de récupérer les retards survenus en 2012 et 2013 dans la production de composants essentiels tels que les cavités et les coupleurs, le projet s'est fixé pour objectif d'atteindre la cadence de production de 4 jours en début 2015. En conséquence, l'occupation de chaque station de montage ne doit pas dépasser 4 jours, et l'intégration doit être complète en moins de 28 jours. Cet objectif a été atteint et maintenu pendant toute l'année 2015. Grâce à cette productivité, 52 cryomodules ont été produits en 2015 et le 80e a pu être mis à disposition par Alsyom le 24 décembre 2015 dans un calendrier globale qui prévoyait l'expédition du dernier cryomodule à la fin avril 2016.

Si les années 2013 et 2014 ont été consacrées d'abord à la maîtrise par le CEA du procédé et de l'outil d'intégration grâce à 3 modules de préséries, avec des difficultés notables dans le soudage certifié des tubes Titane de l'enceinte, puis à surmonter les difficultés de la production industrielle,

Vue aérienne du site E-XFel entre Hambourg et le Schleswig-Holstein. Ses installations souterraines s'étendent sur plus de 3 km.



Cryomodules XFEL dans le tunnel de l'accélérateur.

Clean Room Integration of the European XFEL Cavity Strings Stéphane Berry, Olivier Napoly, Bernard Visentin, François Chastel, Aurélien Clippet, Martin Mbeleg, Philippe Pluvy, Christelle Cloué, Catherine Madec, Thierry Trublet. Jul 2014. 3 pp. Conference: Ipac 2014, p.WEPRI001

Configuration Management in the Series Production of the XFEL Accelerator Modules Lars Hagge et al. Jul 2014. Conference: Ipac 2014, p.THPRO006

Qualification of the Titanium Welds in the E-XFEL Cryomodule and the CE Certification Serena Barbanotti et al. 2014. 3 pp. Conference: Linac 2014, p.TUPP019

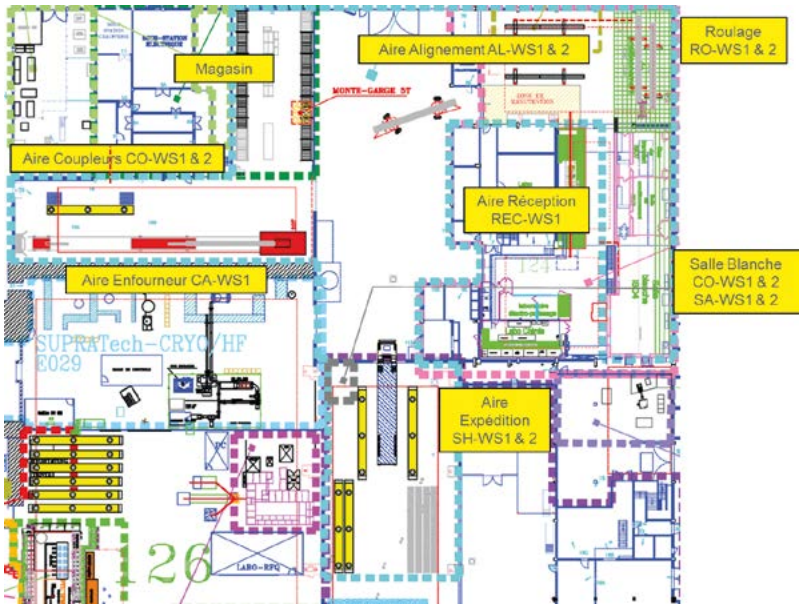
Dotation du ministère et de E-XFEL GmbH

Desy, CNRS/LAL, INFN

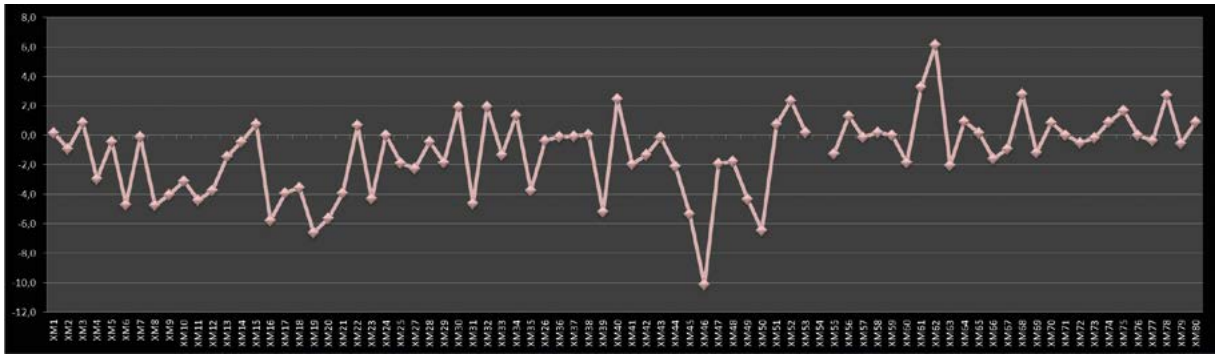
en particulier le traitement et la résolution des non-conformités des produits (ex. les cryostats) et de procédures (ex. le montage des coupleurs), la production a atteint une cadence nominale d'expédition hebdomadaire en octobre 2014 avec le module XM15, puis rapidement d'un cryomodule tous les 4 jours en janvier 2015 avec le module XM25.

Grâce à l'amélioration continue des procédés d'assemblage basée sur des audits de terrain et sur l'analyse et le perfectionnement des procédures de montage, surtout en salle blanche où les cavités supraconductrices sont le plus exposées aux particules, le projet a franchi un cap majeur dans la qualité de l'assemblage, à partir du module XM26 et surtout du module XM55, en maintenant le champ accélérateur des cryomodules au niveau de celui obtenu lors des tests de qualification individuels des cavités à Desy courbe ci-dessous. Ce maintien des performances, sans dégradation, n'avait jamais été réalisé auparavant à ce niveau de champ accélérateur nulle part dans le monde.

Le projet E-XFEL est un exemple réussi de partenariat des laboratoires de recherche avec l'industrie principalement européenne (Zanon, RI, Thales, Alsyom, Aperam, MecaMagnetic, Jehier, etc…) dans la production en grande série de composants accélérateurs de haute technicité pour la construction d'un accélérateur supraconducteur de très grande taille. Pour sa part, le CEA a initié et mené un partenariat original qui a permis l'industrialisation de l'assemblage des cryomodules dans ses infrastructures, avec ses équipements et outillages, et sous la supervision des équipes de l'Irfu.



Plan du Village XFEL avec la chaîne des 7 stations de montage.



Gain en champ accélérateur (MV/m) des modules XM1 à XM80.

LE COLLISIONNEUR CLIC

Recent Results from CTF3 Two Beam Test Stand, W. Farabolini et al., IPAC2014, Dresde

Contribution exceptionnelle de la France au Cern : Eucard2

ERN, Uppsala University, Thales Electron Devices, Mecachrome

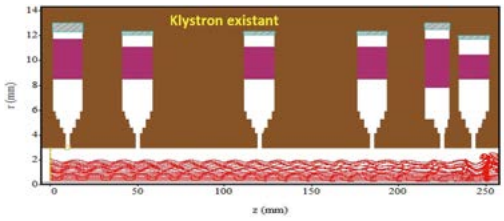
Clic (Compact Linear Collider) est un projet de collisionneur linéaire d'électrons-positons pour la physique des très hautes énergies, et est un candidat potentiel pour succéder aux expériences du LHC. Le collisionneur Clic vise une énergie de collision de 0,38 à 3 TeV et une luminosité de 1 à 2,10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$ sur une distance de 11 à 50 km. Il s'appuie sur un concept novateur « d'accélération à deux faisceaux » à la fréquence élevée de 12 GHz et un gradient accélérateur très élevé de 100 MV/m. Ce nouveau concept est étudié expérimentalement sur la plateforme d'essai Clic Test Facility (CTF3) au Cern.

BANCS DE TESTS D'ACCÉLÉRATION À DEUX FAISCEAUX

L'injecteur à électrons Califes de CTF3 qui simule le faisceau principal de Clic a fourni du faisceau pendant la période 2013-2015 pour à la fois étudier les paramètres de l'accélération à deux faisceaux et caractériser une large palette d'éléments de diagnostic du futur Clic. Deux structures accélératrices 12 GHz conçues et réalisées par les équipes du SACM et du SIS en étroite collaboration avec le Cern et les entreprises Mecachrome et Thales ont été installées et testées sur un premier banc de test à deux faisceaux (Two Beam Test Stand –TBTS) de 2012 à 2013. Ces deux structures sont équipées de détecteurs de position de faisceau non interceptifs du type « wakefield monitor ». Ces tests ont démontré que ces détecteurs permettent une détermination de la position et donc un alignement des cavités à mieux que 10 microns, ce qui est indispensable à la future machine Clic pour contenir l'émittance du faisceau, et par là même occasion atteindre la forte luminosité demandée. Fort de ces résultats, un système de réglage et d'alignement actif a été intégré dans le nouveau module prototype à deux faisceaux (Two Beam Module – TBM) installé en 2014 en remplacement du TBTS, et les essais en cours démontrent une capacité d'alignement proche des 5 microns requis par le design de Clic.

KLYSTRON À HAUT RENDEMENT

La deuxième problématique importante pour les cavités accélératrices est de fournir un gradient accélérateur de l'ordre de 100 MV/m, tout en contenant la production de claquages. Pour cela, il a été démontré qu'il est important de procéder à un conditionnement RF à forte puissance sur chaque cavité, lequel est mis en œuvre à l'aide de stations RF comprenant des klystrons à 12 GHz. Comme il est prévu de l'ordre de 150000 cavités dans la version Clic à 3 TeV, ce conditionnement s'étalera sur de longues périodes et sera énergivore et couteux en investissement de modulateurs haute tension. De ce fait, il a été mis sur pied en 2013 un programme de R&D focalisé sur l'amélioration du rendement des klystrons dans la bande X. Dans ce cadre, le SACM a proposé un nouveau concept de klystron à 12 GHz appelé kladistron, basé sur l'augmentation dans la même longueur d'intéraction du nombre de cavités du klystron, afin d'obtenir un meilleur groupement longitudinal des paquets et donc une extraction plus efficace du faisceau au niveau de la cavité de sortie. Un gain de l'ordre de 10 points de rendement est attendu par des simulations basées sur des codes de transport de particules. Un prototype à 5 GHz est en cours de réalisation pour valider ce concept. Ce travail fait l'objet depuis octobre 2014 d'un partenariat avec Thalès.



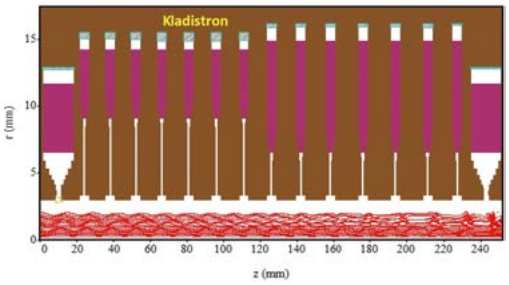
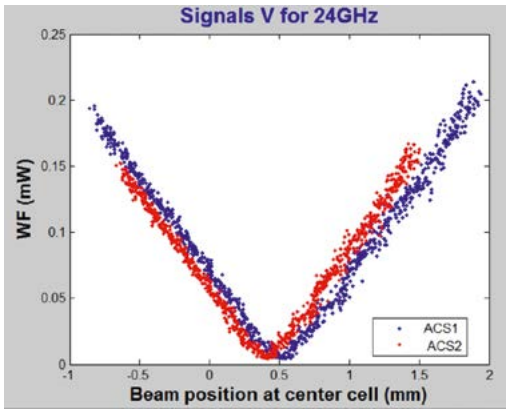


Schéma de principe du kladistron.



Mesures de position transverse du faisceau dans les cavités Clic dans le TBTS à l'aide des wakefield monitors à 24 GHz.

LES DIAGNOSTICS POUR ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

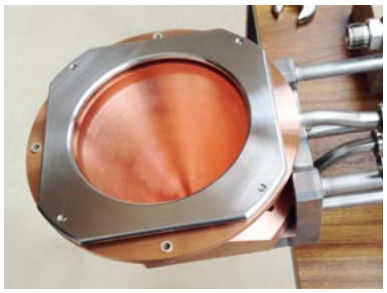
L'instrumentation dans les accélérateurs désigne l'ensemble des diagnostics installés sur la machine et dont les signaux renseignent sur son état de fonctionnement et permettent son réglage.
Éléments essentiels pour la mise en route et le fonctionnement d'une machine, les diagnostics nécessitent au minimum :

- Une estimation de l'intensité du faisceau.
- Une mesure de la position du centre de gravité du faisceau.
- Une estimation de la « qualité » du faisceau en distribution spatiale et en énergie.
- Une estimation de la pureté des particules qui compose le faisceau.

Au sein du SACM, plusieurs diagnostics sont développés :

INTENSITÉ

La mesure de courant d'un faisceau de particules chargées dépend essentiellement de sa densité de puissance. La méthode la plus simple est d'intercepter le faisceau avec une coupelle électriquement isolée et de collecter les charges du faisceau. Pour le projet Fair, une coupelle de Faraday a été développée pour supporter 200 W de puissance moyenne et jusqu'à 8 kW de puissance crête.
Une autre méthode par mesure non-interceptive avec un transformateur de courant (appelé ACCT), utilisant l'induction magnétique permet de détecter efficacement les variations d'intensité. Ce diagnostic est adapté au faisceau pulsé, comme pour le projet Fair. Mais l'induction magnétique peut être perturbée lorsque la spire se trouve plongée dans un fort flux magnétique constant, comme celui généré par le champ de fuite d'un solénoïde. Le bon fonctionnement de cet équipement a été testé sur la ligne basse énergie d'Iphi, en optimisant la conception mécanique du blindage magnétique de la spire.



Coupelle de Faraday et Transformateur de courant (ACCT) Fair.

POSITION

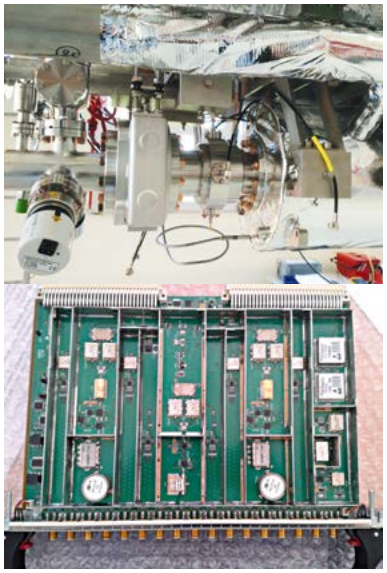
Les moniteurs de position de faisceau (BPM), éléments non-destructifs, permettent de mesurer l'alignement du faisceau, la mesure de son intensité et le contrôle de son temps de passage. Différents types de BPM sont en cours de développement.

• BPM basés sur des cavités radiofréquence

Le principe est le suivant : le faisceau, en passant à travers la cavité, excite des modes électromagnétiques qui génèrent des signaux sur 4 antennes montées à 90° autour du tube faisceau.

Pour le projet E-XFEL, le SACM est responsable de l'étude, de la réalisation et de la mise en place de la cavité avec ses antennes et son l'électronique de traitement dédiée, pour 31 moniteurs de position (dits BPM ré-entrants). Ces diagnostics sont montés à l'intérieur des cryomodules du Linac. L'électronique de ce système, permettant le traitement du signal venant de la cavité, est intégrée sur un circuit imprimé et insérée dans un châssis commun à tous les BPMs de la machine. Ce châssis est développé par l'institut PSI (Paul Scherrer Institute). Un BPM ré-entrant installé dans un cryomodule 3,9 GHz est déjà en fonctionnement sur l'injecteur. Un autre, installé dans une section chaude sur l'accélérateur Flash2 à Desy, a permis, grâce à diverses campagnes de mesures, la qualification de l'ensemble du système.

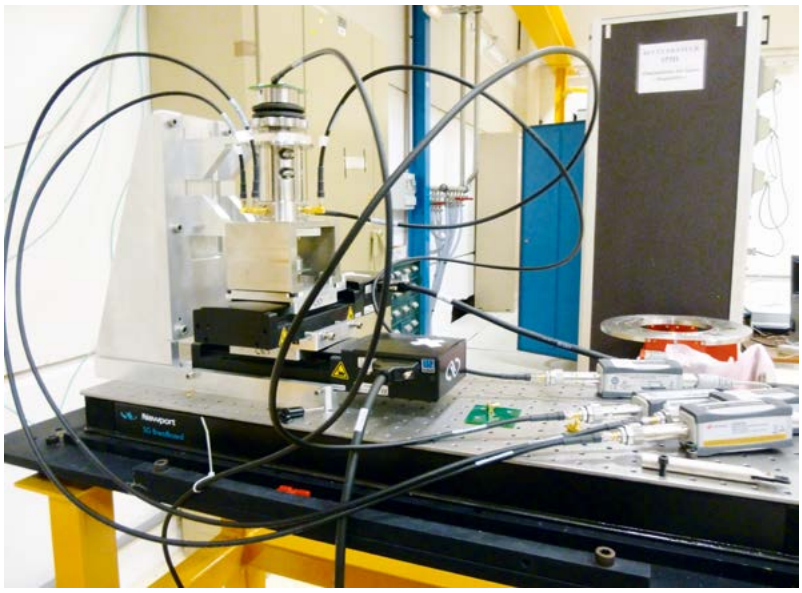
Moniteur de position de faisceau installé dans un cryomodule E-XFEL.



Electronique de traitement du signal du BPM « cavité ré-entrante » E-XFEL.

• BPM basés sur un moniteur électrostatique

Nous développons également un moniteur dit « BPM bouton » basé sur une conception électrostatique. Cet élément est composé de 4 électrodes. L'idée est de mesurer les charges induites par le champ électrique du faisceau de particules sur une plaque métallique isolée. Le faisceau induit d'autant plus de signal sur une électrode qu'il en est proche. L'intensité est déterminée par la somme des signaux venant des 4 électrodes. Ces défauts de positionnement transverse en X et en Y sont donnés par les différences de signaux. Un moniteur de ce type est développé en collaboration avec GSI pour la section « inter-tank » du proton Linac Fair. Les calculs de radiofréquences ont abouti à la réalisation mécanique d'un prototype qui a été mesuré sur un banc de test dont la conception et la réalisation ont été



BPM Fair installé sur le banc de test.

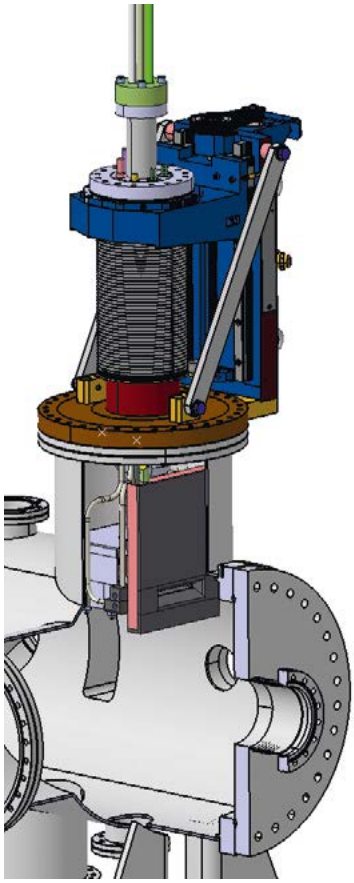
effectués par l'Irfu. Un programme permet de caractériser la sensibilité, la linéarité, d'effectuer une carte de position, et de déterminer le centre électrique du BPM. Un prototype de préamplificateur pour 2 voies a également été réalisé et mesuré.

Pour le projet Saraf, un autre moniteur BPM basé également sur une conception électrostatique est en cours d'étude. Il sera intégré dans les cryomodules et fonctionnera autour de 4 K.

QUALITÉ

La qualité d'un faisceau est déterminée par une mesure interceptive en produisant « la figure d'émittance », qui relie l'intensité du faisceau relative à sa position x et son angle x' par rapport à l'axe de propagation z. Deux techniques de mesures sont en cours de développement : « l'Allison scanner » et l'émittancemètre 4D communément appelé « Poivrier ». Pour le projet Ifmif, le choix a été porté sur un « Allison scanner » qui permet de relier la position x à x'. Pour le projet ESS une seconde mesure s'effectue dans l'autre plan reliant y avec y'. Ainsi une représentation juste du faisceau est réalisée permettant de connaitre son évolution et donc sa « qualité ».

Le principe de mesure est basé sur la déflection électrostatique des particules chargées composant le faisceau d'ions par



Emittancemètre ESS.

un jeu de plaques polarisables parallèles. La qualité du faisceau est définie comme étant la surface d'ellipse dans l'espace des phases. Cette ellipse est obtenue est mesurant I(x,x') qui représente l'intensité faisceau en fonction de la position x de la fente de sélection et de l'angle x' du faisceau sélectionnée par la fente.
L'angle x' est obtenu en mesurant le courant faisceau en fonction du champ électrique E établi par les plaques polarisées et les caractéristiques des particules du faisceau (charge, masse et énergie).
Une des difficultés techniques lors de la conception d'un émittance-mètre de type Allison est la réalisation de la fente d'entrée. En effet cette fente est directement positionnée dans le faisceau incident à qualifier.
Dans le projet Ifmif, le faisceau de deutérium véhicule 15 kW de puissance continue, un astucieux brasage de tuile de tungstène sur du cuivre, et un refroidissement adapté permettent de garantir la tenue de la fente malgré la dilatation thermique des matériaux.
Dans le cadre du projet ESS, un couple d'Allison scanner est en cours de développement permettant de supporter une puissance de 750 W du faisceau rapportée à une tâche minimum de 6 mm de diamètre (soit une densité de puissance de 2,7 kW/cm^2). La technique de compression isostatique à chaud du tungstène sur du cuivre pour les blocs d'arrêt et l'utilisation d'alliage exotique (TZM) pour les fentes de sélection permettent de tenir ces flux de puissance.

Dans le cadre de l'accélérateur linéaire Myrrha, il est primordial d'accorder une grande importance au réglage de l'injecteur, non seulement pour des questions de qualité de faisceau et de minimisation des pertes, mais aussi car cet accélérateur de type ADS doit pouvoir fonctionner avec un degré de fiabilité très élevé, encore jamais atteint par les accélérateurs de forte puissance actuels. Les diagnostics sont donc une composante essentielle dans la surveillance et la compréhension de la physique des faisceaux. Dans ce cadre le SACM a démarré un programme ambitieux de R&D avec le développement de l'émittancemètre 4D visant à caractériser la distribution du faisceau dans les 4 dimensions de l'espace des phases transverse avec une précision inégalée. Son développement a été initié avec le programme Needs en 2013 et se poursuit dans le cadre du programme Myrte.

Commissioning of the High Intensity Proton Injector of the Facility for Anti proton and Ion Research at CEA-Saclay – Ecris 2016

R&D service, Needs, Collaborations en nature ESS, Fair, XFEL

ESS, Fair, Ifmif, XFEL, IPNO, PSI, Desy

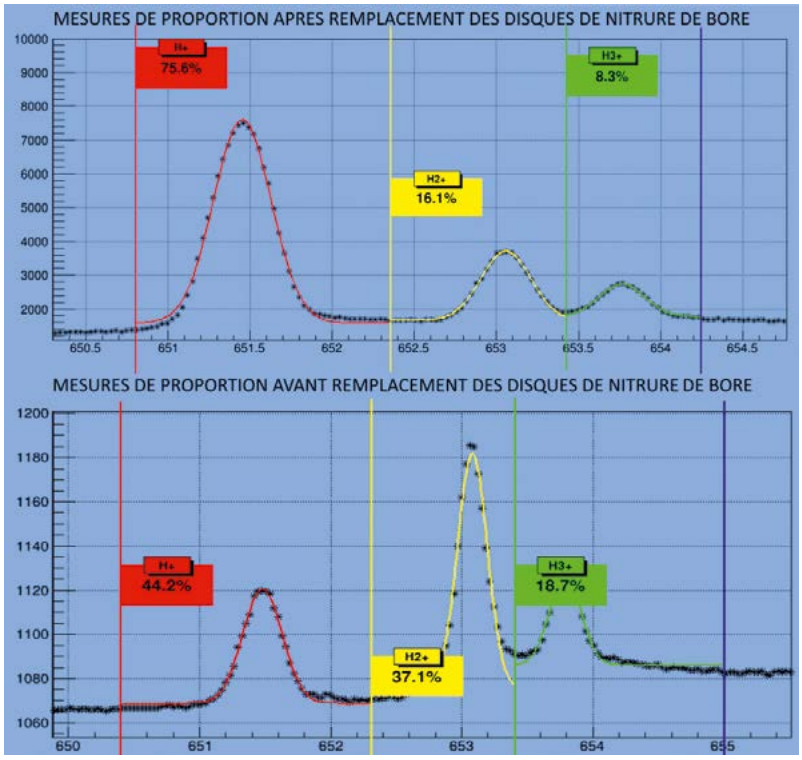
Ce dispositif comprend un arrêt faisceau percé de 100 trous de 70 µm de diamètre distants de 7 mm, disposés 10 par 10. Les 100 pinceaux ainsi formés vont ensuite frapper une surface émettrice de lumière., On récupère l'information en faisant une photo avec une camera CCD déclenchée. Le choix du scintillateur est un des points clé de l'appareil. Afin d'augmenter la résolution, le poivrier peut se déplacer dans les deux directions transverses au faisceau entre chaque photo. Ainsi la prise d'une centaine de clichés et un traitement numérique adapté permettent de remonter jusqu'aux paramètres de l'émittance du faisceau. L'avantage de cette mesure est de donner le résultat dans les deux plans simultanément.

PURETÉ

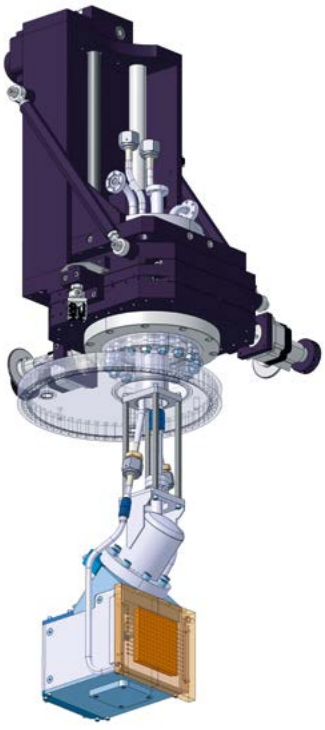
Une estimation de la proportion des espèces de particules qui composent le faisceau permet d'optimiser le réglage du plasma de la source. On cherche à maximiser la quantité, par exemple de protons pour Iphi et de deutons pour Ifmif, autrement dit à optimiser la pureté du plasma. Les autres espèces présentent sont considérées comme parasites. Les valeurs de pureté attendues sont de l'ordre de 80 %. Ces mesures permettent également de suivre l'évolution du rendement du plasma au cours du temps. En effet, il a été démontré que la détérioration des disques de nitrure de bore, présents dans la source, influe de manière importante sur la pureté du plasma.

Deux diagnostics utilisant des phénomènes physiques totalement différents sont utilisés pour ces mesures de pureté.

- Le premier réalise une mesure de l'intensité (nombre de photons) de la raie Hα de la série de Balmer de l'hydrogène atomique ayant subi un décalage Doppler dans la direction d'observation. C'est un diagnostic optique non interceptif parfaitement adapté aux injecteurs de haute intensité. Ce type de diagnostic a été développé pour l'injecteur Iphi, d'Ifmif et il est en cours de développement pour ESS.
- Le second est appelé filtre de Wien et il réalise une mesure de l'intensité (collection de charges) déposée sur une coupelle de Faraday pour chaque espèce préalablement séparée et sélectionnée par un déflecteur électrostatique dans un champ magnétique. C'est un diagnostic interceptif (sélection du pinceau de faisceau par un trou de 100 µm de diamètre), bien adapté aux machines pulsés à cycle court en raison des problèmes de thermique. Un filtre de Wien est en cours d'assemblage pour le projet Fair Proton Linac utilisant une configuration magnétique de type Halbach.



Résultats des mesures de proportions en protons à une énergie de 50 keV obtenus à Rokkasho en décembre 2015 et janvier 2016.

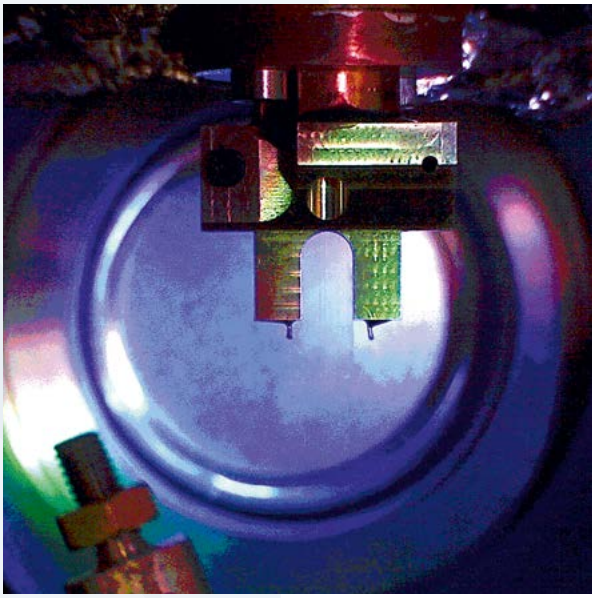


Emittance mètre 4D basse-énergie, actuellement en phase finale de fabrication. Il devrait être testé sous faisceau courant 2017.

les ACTIVITÉS et PROGRAMMMES

SACM **2013-2015**

cryogénie



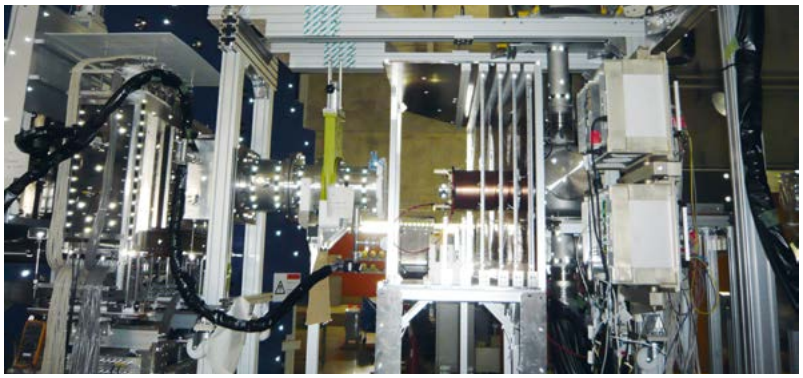
LES CIBLES D'HYDROGÈNE LIQUIDE DU PROJET MINOS (Magic Numbers Off Stability)

Extension of the N=40 Island of Inversion towards N=50: Spectroscopy of 66Cr, 70;72Fe, PRL 115, 192501 (2015)

MINOS: A vertex tracker coupled to a thick liquid-hydrogen hydrogen target for in-beam spectroscopy of exotic nuclei. Eur. Phys. J.A (2014)

European research Council ERC730258567

Riken



Le cryostat de la cible Minos (à droite) dans son contexte.

Dans le cadre du programme d'étude sur les noyaux exotiques du SPhN, le SACM/LCSE a réalisé pendant cette période de 3 ans (2013-2015), deux systèmes cryogéniques répondant aux besoins en cibles d'hydrogène de grandes épaisseurs (100 et 150 mm) pour le projet Minos (financement ERC) déjà en exploitation et en cibles minces (20 et 50 µm) pour le projet Chymène (financement ANR) actuellement en développement.

Les cibles liquides du projet Minos sont utilisées dans le cadre d'une collaboration internationale (12 pays) à Riken au Japon depuis mai 2014. Quatre expériences de trois semaines chacune ont été effectuées en utilisant le dispositif Minos associé aux systèmes de détection du laboratoire d'accueil. Par sa conception, le cryostat offre l'espace nécessaire à la détection, notamment celle de la TPC (« Temporel Projection Chamber ») de Minos.

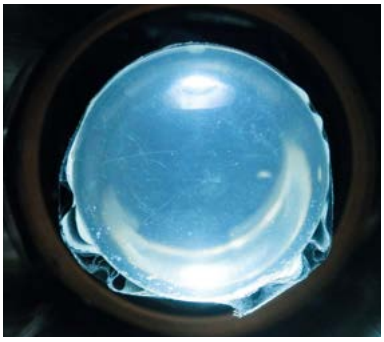
Le cryostat (photo ci-dessus) permettant l'obtention de l'hydrogène liquide (photo de droite) est équipé d'un cryogénérateur commercial dont la puissance de la tête froide est de 15 W (à 20 K). Le choix du cryogénérateur (compresseur et tête froide) est motivé par la simplicité de son utilisation (besoin en eau et en courant seulement). L'absence de structure cryogénique dans le laboratoire d'accueil (pas d'hélium liquide à disposition) et de personnel spécialiste ont été deux facteurs également déterminants. Pour terminer, le faible encombrement de la tête froide est parfaitement adapté aux contraintes de la détection.

Le cycle cryogénique débute par la mise en froid du système sans hydrogène en 12 heures. La phase de liquéfaction commence par le transfert de l'hydrogène gazeux depuis son stockage, à une pression absolue initiale de 1,5 bars, vers le cryostat via une baie cryogénique. L'hydrogène se liquéfie à la température de 20,4 K à la pression atmosphérique dans le condenseur d'un volume d'un litre qui est monté sur le second étage de la tête froide. Celui-ci alimente progressivement par gravité la cible en hydrogène liquide. Les vapeurs froides alors produites retournent dans le condenseur via une boucle fermée pour se liquéfier. Pour terminer l'opération, lors du réchauffage régulé en température, l'hydrogène liquide se vaporise et réintègre via les clapets anti-retour sa réserve dédiée. Par sa conception, ce système cryogénique minimise la quantité d'hydrogène mise en jeu (120°grammes NPT) et garantit la sûreté du système qui utilise un fluide détonant utilisé aux conditions cryogéniques.

Plusieurs types de cibles sont disponibles suivant les caractéristiques du faisceau utilisé à Riken. La cible de géométrie cylindrique en Mylar® est constituée d'une fenêtre d'entrée (Ø 39 mm) et d'un cylindre (Ø 52 mm) de 3 longueurs différentes (60, 100 ou 150 mm). Des tests de rupture de la cible à la température de 77 K réalisés dans notre laboratoire donnent une pression de rupture de 5,9 bars par rapport à la pression maximum de 1 bar. Afin d'éviter le sur-accident en cas de rupture de la cible liquide, l'hydrogène reste confiné dans le cryostat et la pression du gaz H_2 lors de sa vaporisation sur les parois à température ambiante du cryostat monte à 700 mbars absolu grâce à la connexion du cryostat à un volume tampon de 280 l. La gestion de ce type d'accident est assurée par un programme dédié à la surveillance de la cible.

Le système de contrôle-commande pilote la régulation de température et le fonctionnement des différents équipements. Il prend également en charge la demande des physiciens concernant la possibilité d'une mesure en cible « vide », en fait remplie par du gaz H_2 avec une densité bien moindre (rapport des densités de 106 à 18 K entre le liquide et le gaz H_2). Cela permet en cours d'expérience de mesurer rapidement le rapport signal sur bruit créé par l'enveloppe en Mylar® et de vérifier l'optimisation des réglages des différents appareils de détection.

Environ 15 analyses de données sont en cours. Trois nouvelles expériences supplémentaires sont programmées en 2016 et 2017.



J-M. Gheller et Al. *Thin-Thick Hydrogen target for nuclear Physics*, Adv. In Cryogenic Engineering (Anchorage 2013, Vol. 1573 59A)

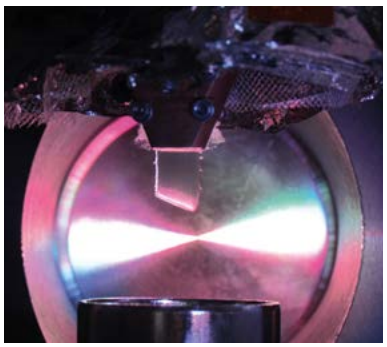
ANR31

LA CIBLE D'HYDROGÈNE SOLIDE POUR LE PROJET CHYMÈNE (Cible d'Hydrogène Mince pour l'Étude des Noyaux Exotiques)

Ce projet de cible mince s'inscrit dans la perspective d'expérience au Ganil/Spiral2 de l'Irfu (ou tout autre machine de type Isol[1]) pour l'étude de noyaux radioactifs. La cible doit pouvoir s'insérer dans la géométrie d'expériences existantes incluant la détection de particules chargées dans le vide (Gaspard[2]) ou de photons (Agata) autour de la cible. Le système sera validé au préalable sur accélérateur du IPN-Orsay ou du CEA/DAM à Bruyères le Châtel. La conception et la réalisation ont nécessité 30 mois, associant trois instituts pour le développement du système complet dont les services SACM, SIS et SPhN de l'Irfu, CEA/DAM et IPNO. Depuis janvier 2014 le cryostat produit de l'hydrogène solide. La mise au point du système et les études sur l'épaisseur de la cible sont en cours au LCSE.

Les contraintes de la chambre à réaction associées à celles de l'ensemble de détection ont imposé la géométrie du cryostat Chymène. La méthode choisie pour la production de la cible est celle de l'extrusion en continu d'un ruban d'hydrogène pâteux, solution qui répond à la demande d'un fonctionnement de 15 jours sans arrêt de l'utilisation de la cible. L'alimentation en permanence du système en hydrogène suffit à pérenniser la cible dans la chambre à réaction qui nécessite un niveau de vide de 5.10^{-5} mbars pour le fonctionnement de la détection. La production de ruban qui se sublime dans la chambre est équivalente à une fuite permanente de 5 mbars.l/s pour une cible de 50 µm soit une capacité de pompage de 10^5 l/s pour atteindre la spécification. Les équipements commerciaux proposés sont inenvisageables autant par leur coût que par leur encombrement très important. Bien que la capacité de pompage soit sous dimensionnée le taux de vide actuellement obtenu lors de nos essais est de 5.10^{-4} mbars pour la production d'une cible avec une buse de 20 µm (largeur 5 mm utile). Ces premiers résultats sont pris en compte actuellement par l'IPNO en charge de la conception de la chambre. Le système Chymène est constitué d'un cryostat motorisé qui permet la translation verticale pour extraire la cible de l'axe faisceau et une rotation de la cible de 100° pour dégager des angles d'analyse en cours d'expérience. Le cryostat est équipé d'une source cryogénique (tête froide) fournissant la puissance nécessaire de 15 W à 11 K pour la formation de la pâte d'hydrogène en partie basse de l'extrudeur. La buse montée à son extrémité donne la géométrie de la cible (photo ci-contre). La puissance cryogénique est transmise du 2e étage de la tête froide à l'extrudeur uniquement par conduction à travers deux métaux à très forte conduction thermique : aluminium (10 kW/m.K et cuivre (2,2 kW/m.K à 11 K). L'hydrogène liquide coule par gravité à l'intérieur de l'extrudeur et se solidifie dans la partie plus froide de l'appareil dès 14 K (5 bars absolus). La glace d'hydrogène produite est comprimée mécaniquement à 100 bars dans l'extrudeur avant l'expulsion du film d'hydrogène à travers la buse.

Plusieurs buses sont étudiées couvrant une gamme de 180 µm jusqu'à 20 µm d'épaisseur. Outre l'épaisseur, elles doivent assurer la stabilité du positionnement du ruban face au faisceau. L'obtention d'une cible avec une épaisseur constante dépend d'une part de la température et de la vitesse d'écoulement de la pâte d'hydrogène. D'autre part, l'homogénéité de l'épaisseur est sensible à la conception de la buse (choix de la matière, géométrie interne et interaction pâte/ parois internes) ainsi qu'à la précision de la réalisation mécanique et à la qualité de l'assemblage. Des mesures d'épaisseur et d'homogénéité se déroulent actuellement. Nous caractérisons la cible avec une source ^{241}Am qui délivre principalement des particules alpha de 5,485 MeV. La méthode choisie est la mesure dans un détecteur silicium de la perte d'énergie des particules α qui traversent la cible. Avec l'intensité modeste de la source disponible (comparée à celle d'un faisceau), la mesure est principalement sensible à l'épaisseur de la cible intégrée sur sa largeur dans une période de temps de l'ordre de une à deux heures suivant les conditions de collimation.
L'objectif à court terme est d'obtenir des épaisseurs constantes sur plusieurs jours de production du ruban d'hydrogène ainsi que de basculer sur la production d'un ruban de deutérium. A moyen terme, en plus de son application en physique nucléaire, le cryostat Chymène pourrait également participer aux développements de faisceaux secondaires de protons par impulsion laser sur des films d'hydrogène d'épaisseur inférieure à 10 µm.



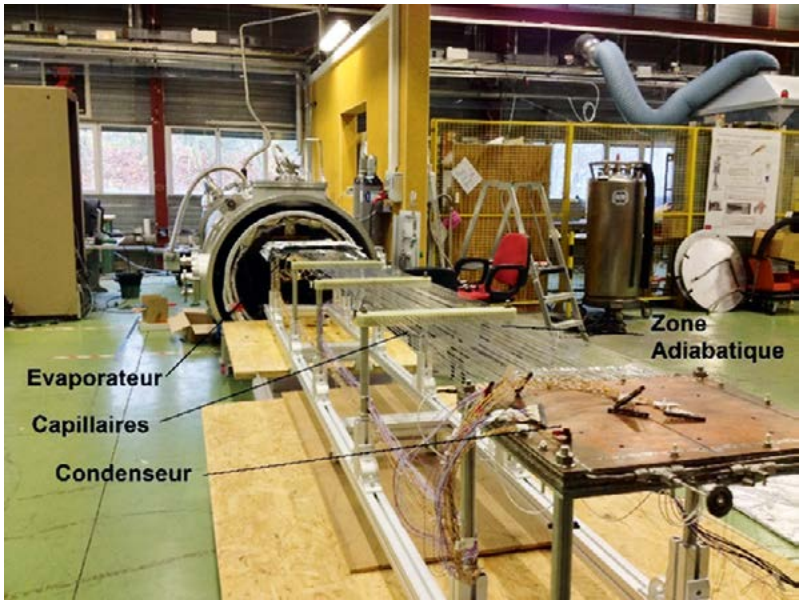
Défilement du ruban d'hydrogène dans Chymene.

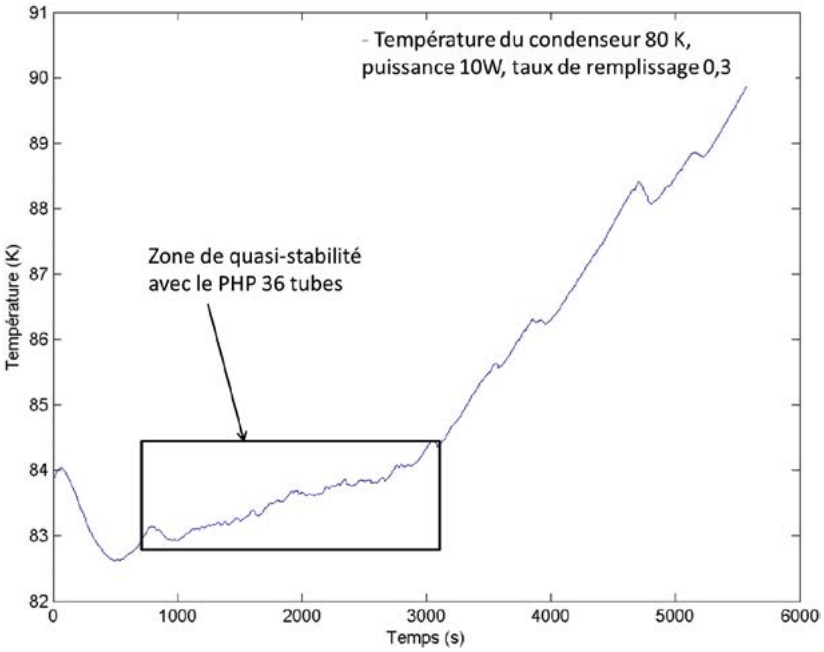
[1] Isotope Séparation On-Line/Méthode de production, de tri et de sélection des noyaux radioactifs.
[2] GAmma SPectroscopy and PARticle Detection.

CALODUCS CRYOGÉNIQUES OSCILLANTS

Les caloducs oscillants sont de très bons candidats pour constituer des liens thermiques légers, passifs et thermiquement très efficaces entre un système à refroidir et un cryo-générateur. Comme ils peuvent être construits de façon à fonctionner indépendamment de la gravité, ces caloducs ont été intégrés à la conception cryogénique du projet d'aimant spatial SR2S. Pour répondre aux spécificités de ce projet, des caloducs cryogéniques à l'azote mesurant environ 3,6 m de long ont été étudiés expérimentalement. Un caloduc oscillant est composé d'un tube capillaire lisse faisant plusieurs allers-retours entre un évaporateur et un condenseur avant de se reboucler sur lui-même. Ce tube est partiellement rempli de liquide et son diamètre est dimensionné pour que le phénomène de capillarité domine et crée une alternance de poches de vapeur et de bouchons de liquide qui vont osciller et créer un échange de chaleur très important par convection et changement de phase. Une station de test dédiée à ces caloducs a été construite en 2015 (cf. photo) et des premiers résultats encourageants ont été obtenus sur des caloducs de grande taille fonctionnant à l'azote liquide. Comme le montre la courbe, les régimes de fonctionnement quasi stable sont encore un peu courts (33 min) pour valider ce type de liens thermiques dans une conception cryogénique d'aimant mais les performances thermiques obtenues sont très élevées. En effet, l'analyse du test montre que pour un caloduc de 36 tubes de 1,5 mm de diamètre la conductivité équivalente est très grande, de l'ordre de 10^5 W/m.K, similaire à celle des caloducs de petites tailles déjà étudiés dans d'autres laboratoires.

Caloducs oscillants de 3,6 m de long.





Évolution de la température pour un test de 10 W sur un caloduc de 36 tubes de 3,6 m de long.

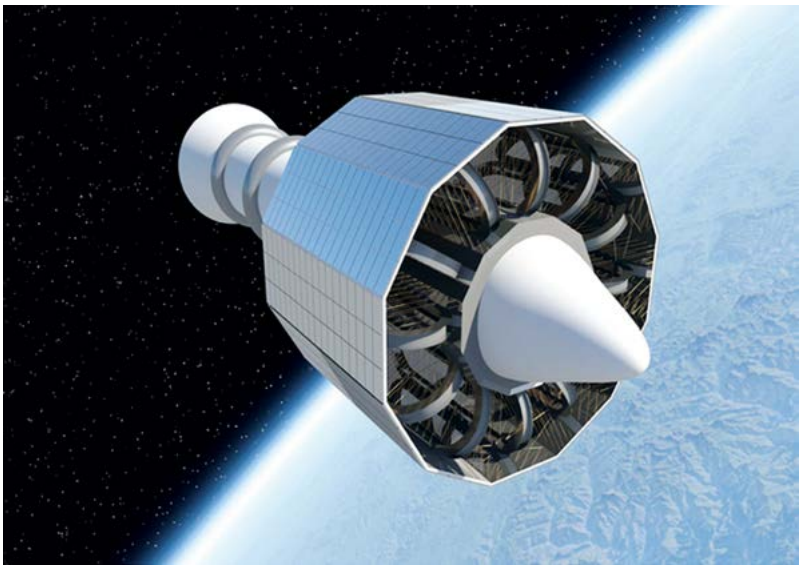
SPACE RADIATION SUPERCONDUCTING SHIELD

R. Bruce, B. Baudouy, Cryogenic Design of a Large Superconducting Magnet for Astro-particle Shielding on Deep Space Travel Missions, Physics Procedia, Volume 67, 2015, Pag. 264-269, ISSN 1875-3892

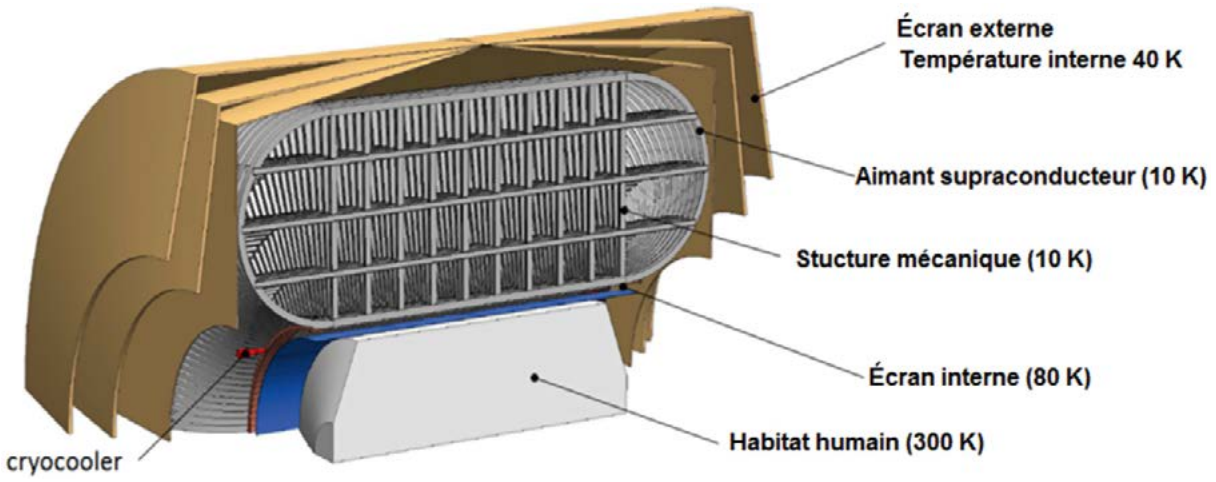
SR2S – FP7-SPACE-2012-1 project n° 313224

INFN, Cern, CEA, Columbus, Thales-Alenia-Space, CGS

Pour envoyer un équipage humain vers Mars, il faudra limiter l'impact des rayonnements ionisants sur le corps humain afin de minimiser le risque de cancer mortel. Les sources de doses reçues dans l'espace sont essentiellement les particules chargées émises par le soleil et les rayons cosmiques galactiques. Alors que des stratégies de blindage existent pour les particules solaires, concevoir un blindage efficace pour les rayons cosmiques est plus difficile. La solution retenue pour protéger la partie habitée d'un vaisseau spatial est de dévier les trajectoires des particules chargées en produisant un champ magnétique statique à l'aide de grands aimants supraconducteurs toroïdaux. Ce système de blindage magnétique requiert des technologies critiques (poids minimal de l'aimant, fiabilité de fonctionnement et de refroidissement) qu'il s'agit de développer et de valider. Le projet européen SR2S (Space Radiation Superconducting Shield ; www.sr2s.eu) s'est attaché à accroître le niveau de ces technologies. Sur trois ans, plusieurs configurations ont été étudiées dont celle d'un aimant toroïdal, similaire à celui du grand détecteur Atlas sur le LHC au Cern (3D ci-dessus), qui produit le champ de blindage souhaité tout en créant un champ quasiment nul dans l'habitacle situé au centre. Les deux principales tâches du SACM ont été d'étudier la protection et le refroidissement cryogénique d'un tel système magnétique : 10 m de long et 5 m de diamètre interne. Le laboratoire a proposé un système de protection innovant basé sur des switchs supraconducteurs et une partition ad-hoc des bobinages composant l'aimant. Sur cette base, lors d'un éventuel quench, la température de l'aimant remonte seulement jusqu'à 170 K sans subir de dommage. Le système de refroidissement utilise une combinaison de technologies spatiales et cryogéniques (3D ci-dessous). Ne recevant in fine qu'une dizaine de watts, l'aimant sera refroidi directement par des cryogénérateurs via des liens thermiques conductifs. Il est également nécessaire d'intercepter la chaleur rayonnée depuis l'habitacle humain, maintenu à 300 K, par un écran maintenu à une température d'environ 80 K. Pour cela, nous avons opté pour des systèmes de refroidissement indépendant de la gravité afin de distribuer la puissance des cryogénérateurs sur l'ensemble de l'écran. Le système retenu est un caloduc oscillant multicanaux actuellement en test au SACM (voir section Caloducs Oscillants).



Aimant toroïdal à 12 bobines entourant la partie habitable du vaisseau spatial.

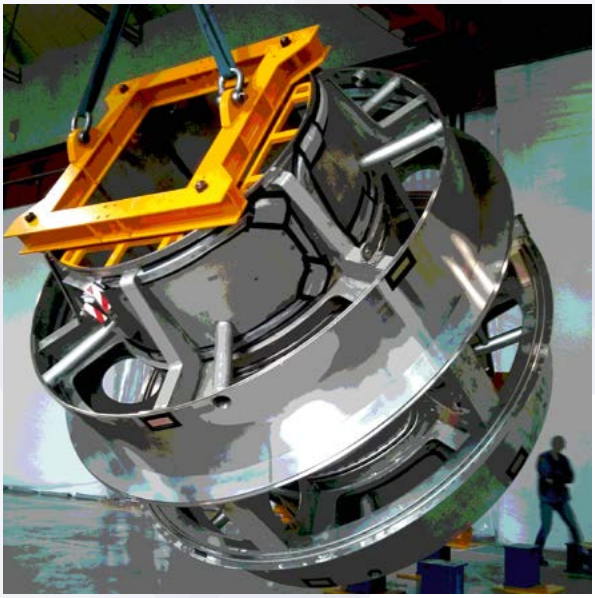


Concept Cryogénique de SR2S.

les ACTIVITÉS et PROGRAMMMES

SACM **2013-2015**

magnétisme



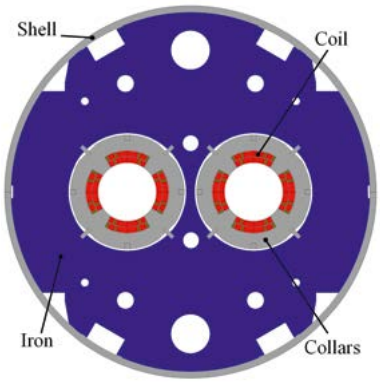
AIMANT MQYY POUR HL-LHC

Collaboration Cern/CEA pour le modèle court et financement européen par PCP (H2020) pour QuaCo

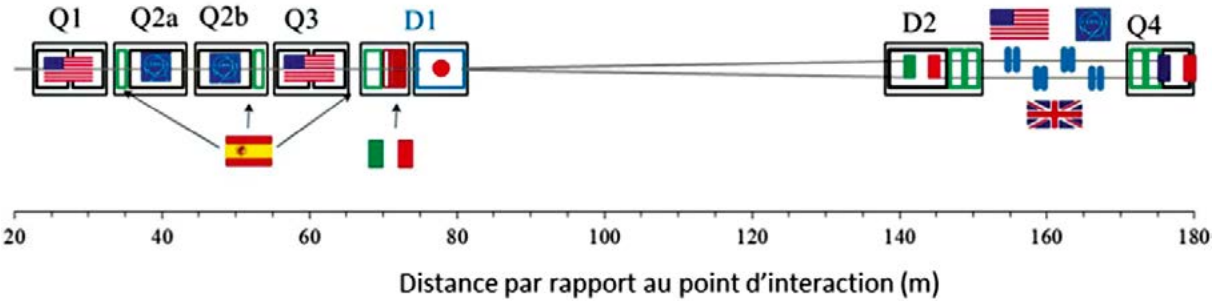
Cern/CEA pour le modèle court, Cern/CEA/Ciemat/NCBJ pour QuaCo

Dans le cadre du projet d'*upgrade* en luminosité du LHC (HL-LHC) prévu à l'horizon 2023, de nouveaux quadripôles, appelés MQYY et assemblés dans la masse froide nommée Q4, sont nécessaires. Ces aimants en NbTi font partie des aimants d'insertion. Ils sont composés de deux ouvertures de 90 mm, distantes (centre à centre) de 194 mm et assemblées dans un circuit magnétique de diamètre extérieur de 614 mm. Ils doivent produire un gradient intégré de 440 T/m pour une longueur magnétique d'environ 3,7 m et un champ maximal sur le conducteur de l'ordre de 6,5 T. Le développement de ces aimants repose sur la conception et la fabrication d'un modèle court (longueur magnétique de 1,2 m) par le Léas, initialement au sein de HiLumi-LHC (étude conceptuelle effectuée dans le cadre du programme européen FP7 de 2011 à 2013), puis dans le cadre d'une collaboration bilatérale avec le Cern. La conception magnétique développée depuis 2013 a été modifiée en 2015 pour prendre en compte une nouvelle contrainte à savoir la limitation du courant maximal dans l'aimant avec pour conséquence un changement de conducteur. Le nouveau concept ci-contre doit être validé début 2017 par le bobinage et la polymérisation d'une bobine modèle de 700 mm, prêts pour l'assemblage et le test du modèle court.

En parallèle et dans le cadre d'un financement européen de type PCP (Pre-Commercial Procurement, Horizon 2020) et au sein d'un consortium avec le Cern, le Ciemat et le NCBJ, le Léas est impliqué dans la fabrication de deux aimants prototypes MQYY dans l'industrie. Ce projet, en cours de préparation appelé QuaCo (Quadrupole Corrector), repose sur un cahier des charges fonctionnel de l'aimant et la mise en concurrence de plusieurs entreprises pour sa conception, son développement et sa réalisation. La cohérence avec les solutions techniques du modèle court est assurée par la fourniture du conducteur par le Cern et du modèle magnétique de l'aimant par le Léas. À l'issue de QuaCo, d'une durée totale de 48 mois, deux prototypes émanant de deux entreprises distinctes seront livrés et testés à froid au sein du consortium. Une série de 4 à 6 aimants fera suite à ce projet.



Vue de l'aimant MQYY.



Représentation des aimants d'insertion pour HL-LHC (E. Todesco, CERN).

FRESCA2

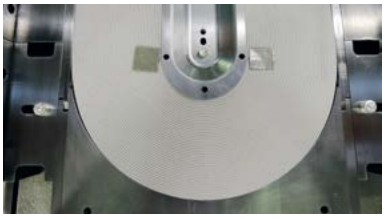
Les activités de R&D du SACM liées à l'utilisation du Nb_3Sn comme matériau supraconducteur pour les aimants à haut champ se concrétisent par la réalisation, dans le cadre du programme européen Eucard, d'un aimant destiné à équiper Fresca2, la nouvelle station de tests des conducteurs au Cern. Développé et réalisé en collaboration avec le Cern, cet aimant est un dipôle de 1,5 m de long capable de fournir un champ au centre de 13 T à 4,2 K dans une ouverture de 100 mm avec une homogénéité de l'ordre du % sur 700 mm. La géométrie retenue est une configuration en blocs ; chaque pôle est constitué de 2 bobines « racetrack », formées chacune de deux couches de conducteur ayant les têtes inclinées pour laisser la place au tube faisceau. Le conducteur est de type Rutherford, constitué de 40 brins de 1 mm de diamètre.

Le traitement thermique (2-3 semaines à des températures allant jusqu'à 650-700 °C) nécessaire à la formation du composé intermétallique qui possède les propriétés supraconductrices entraîne un changement dimensionnel des câbles. La mise en œuvre du Nb_3Sn après réaction est délicate, cela a des conséquences technologiques :

- L'augmentation de la section du conducteur a été prise en compte dès la conception des outillages.
- Des études ont été menées en parallèle pour évaluer la contraction axiale dans les bobines.

La fabrication, à partir de 2013, de deux prototypes à l'échelle 1:1 utilisant un conducteur en cuivre a permis la validation des différentes étapes du procédé de fabrication des double galettes (bobinage, transport, traitement thermique, réalisation des jonctions, instrumentation, imprégnation) et des outillages correspondants. La version finale des outillages de bobinage et de réaction intègre la possibilité d'ouvrir des espaces longitudinaux dans la table de bobinage et l'ilot central, permettant à l'outillage de suivre la contraction axiale des bobines. Cette nouvelle fonction a été expérimentée lors de quatre tests réalisés sur le câble supraconducteur avec l'outillage complet et un nombre réduit de tours.

Après ajustement de la procédure de fabrication, la phase de production des bobines supraconductrices a démarré en juin 2015 et au printemps 2016, les quatre premières double galettes en Nb3Sn seront bobinées, réagies et imprégnées. Les prochaines étapes sont l'assemblage du dipôle dans sa structure mécanique (qui a été préalablement testée au Cern à 77 K) et les tests du dipôle à 4,2 K, prévus fin 2016.



Détail de la tête d'une bobine en fin de bobinage.

Vue d'ensemble d'une double galette sur la table de bobinage avec le moule de réaction partiellement fermé.

Double galette Fresca2 en cours de bobinage.

Development and Coil Fabrication Test of the Nb_3Sn dipole Magnet Fresca2 - Manil et al. [2014]

"Block type" coils fabrication procedure for the Nb_3Sn dipole magnet Fresca2 - Rondeaux et al. [2016]

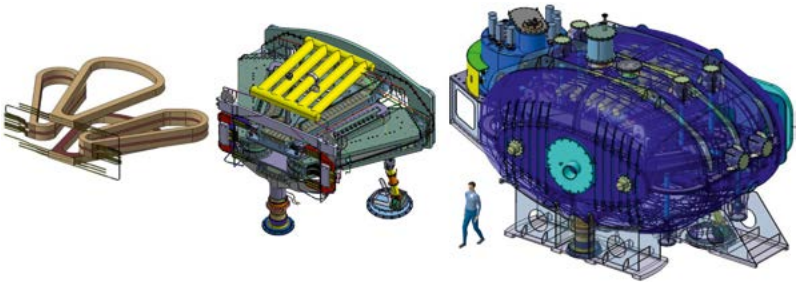
Programme FP7 Eucard (European Coordination for Accelerator Research & Development), grant agreement no. 227579

Collaboration Cern-CEA, agreement KE2275/TE

Cern

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 réalisé dans le cadre du 5e programme-cadre de recherche et développement européen (5e PCRD). La décision de financer la construction de l'aimant Glad a été prise en octobre 2005, au titre du 6e 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 rouge. 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 ; l'ensemble sera déplacé sur coussins d'air. La masse totale de l'aimant est de 55 tonnes.

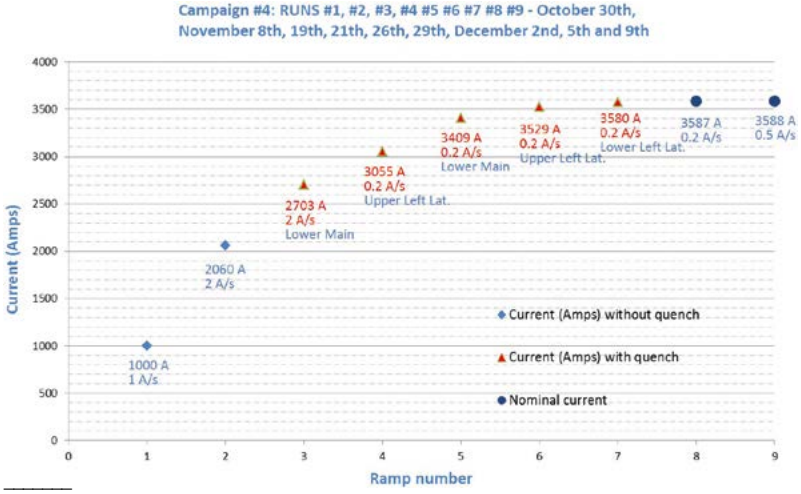
SPÉCIFICATIONS DU SPECTROMÈTRE

Analysant les particules issues des réactions entre le faisceau d'ions radioactifs et la cible secondaire, le dipôle Glad doit prendre en compte les spécifications suivantes :

- Une intégrale de champ de 4,8 T.m permettant de dévier de 18° les ions lourds de forte rigidité magnétique (typiquement 15 T.m pour $^{132}Sn^{50+}$) 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 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 milliradian en angle reconstruit à la cible.

VALIDATION DU FONCTIONNEMENT DE LA BOBINE

Après les tests cryogéniques de la masse froide effectués en 2012 ayant conduit à une modification de la thermalisation du pied fixe de la masse froide, de nouveaux tests ont permis d'atteindre le courant nominal de 3 584 A en décembre 2013. La montée de courant progressive à une vitesse maximale de 2 A/s a cependant été brutalement interrompue à cinq reprises par une transition résistive du bobinage (« quench »). Ces transitions apparaissant à des courants de plus en plus élevées correspondent à une phase de mise en place des bobinages dans leur boîtier



Courbe de training de la masse froide jusqu'au courant nominal.

en alliage d'aluminium. Ce positionnement progressif des conducteurs sous l'effet du chargement mécanique intense s'effectue de proche en proche à chaque montée de courant (« training ») jusqu'à l'obtention du courant nominal. Une fois ce courant atteint, il peut être ramené à zéro puis remonté à sa valeur nominale sans encombre. Un cycle cryogénique peut cependant réinitialiser le processus.

INTÉGRATION DE LA MASSE FROIDE DANS SON CRYOSTAT

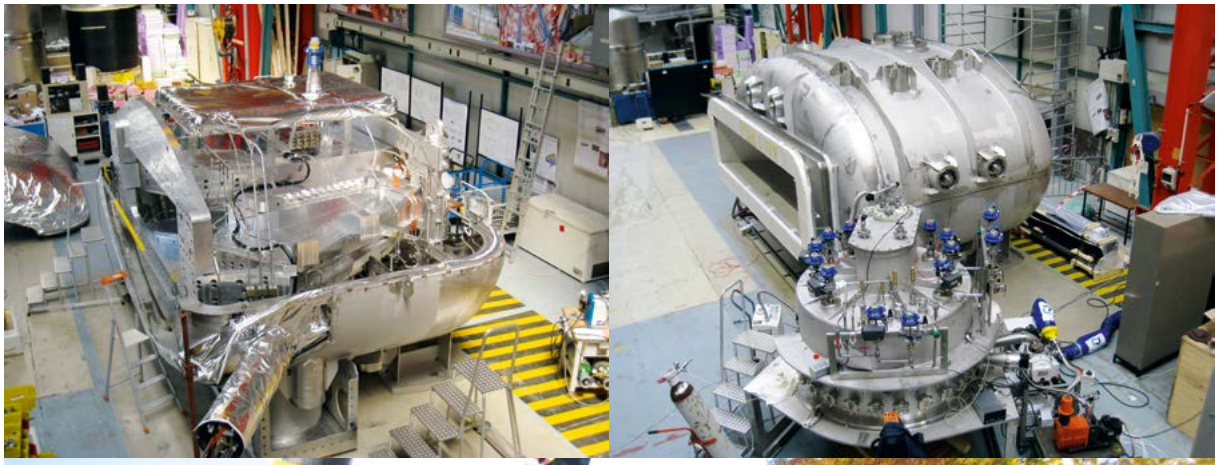
Suite à ces tests positifs, la masse froide a été intégrée dans son cryostat final. En premier lieu, la masse froide a été équipée de son busbar définitif. Ensuite l'opération a consisté en un montage façon « poupées russes » des éléments provenant de l'industrie : écran thermique de Zanon (Italie), Superisolation de Jehier (France) et enceinte à vide de SDMS (France). Enfin l'aimant est finalisé par la réalisation de son satellite cryogénique qui comprend les amenées de courant, les vannes cryogéniques et l'intégralité du routage des câbles d'instrumentation. Un ensemble de tests (étanchéité, isolation électrique, positionnement, contrôle de l'instrumentation) a été réalisé tout au long de cette intégration.

En octobre 2015, l'aimant de 55 tonnes, accompagné de ses baies de contrôle et de sécurité, a été transféré sur le site de GSI où il sera installé en Cave-C puis connecté à son alimentation de puissance et à son réfrigérateur. La mise en service de l'aimant est prévu fin 2016.

Progress in Design and Construction of the R3B-GLAD Large Acceptance Superconducting Dipole Spectrometer for GSI-FAIR, B. Gastineau, C. Mayri, B. Baudouy, C. Berriaud, G. Disset, A. Donati, J.-E. Ducret, D. Eppelle, P. Fazilleau, P. Graffin, J.-L. Jannin, D. Loiseau, J.-P. Lottin, M. Massinger, C. Pes, Y. Queinec, Z. Sun, P. Charon, P. Contrepois, and H. Neyrial. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, N° 3, June 2010

Irfu : 40 %, Europe : 28 %
GSI : 20 %
Collaboration R³B : 12 %

GSI Darmstadt



À gauche : Masse froide déposée dans le demi-cryostat inférieur. La partie supérieure emballée dans de la superisolation est le réservoir hélium de 460 litres alimentant le thermosiphon.
À droite : Aimant complet avec son satellite au premier plan.
En bas : Déchargement de l'aimant à GSI.

LES DIPÔLES SUPER FRS POUR FAIR

Mechanical and Magnetic Design of the Superferric Dipoles for the Super-FRS of the Fair Project. J. E. Muñoz Garcia et al, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.26, Issue 4, 2016

Contribution de la France au projet Fair

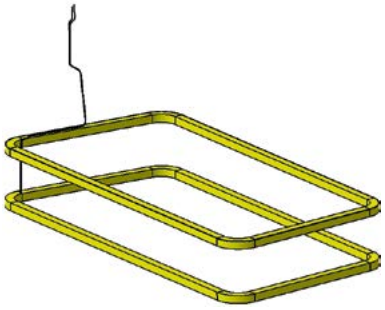
Le complexe Fair (*Facility for Antiproton and Ion Research*) est un accélérateur de particules de nouvelle génération en cours de construction à Darmstadt, en Allemagne, destiné à explorer et comprendre la nature de la matière et l'évolution de l'univers.

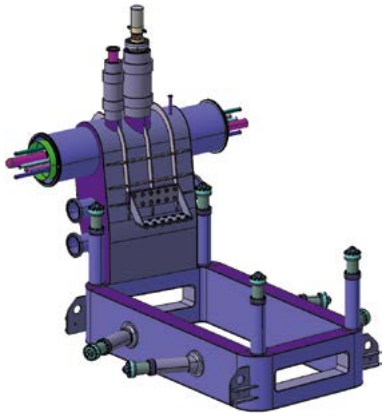
Construit dans le cadre d'une collaboration internationale comptant près de 50 pays, il est conçu d'après l'expérience et les développements technologiques déjà existants sur les infrastructures du laboratoire GSI. L'installation de deux anneaux de type synchrotron fournira des faisceaux d'ions à des intensités de 100 à 1000 fois plus grandes par rapport aux valeurs actuellement disponibles et qui permettront, associés avec des cibles spécifiques, la production de faisceaux secondaires de noyaux instables ou d'antiprotons. Ces faisceaux seront séparés spatialement en quelques centaines de nanosecondes par le séparateur de fragments Super FRS, permettant ainsi l'étude de noyaux de très courte durée de vie. Le Super FRS est constitué d'un grand nombre d'aimants, dont 24 dipôles supraconducteurs. Dans le cadre de la contribution Française au projet Fair, le SACM a en charge le suivi de la fabrication de ces 24 dipôles et participera aux tests à froid prévus au Cern à partir de 2017.

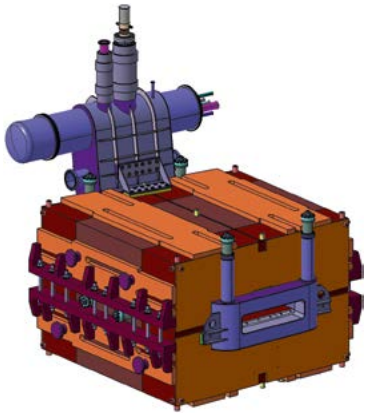
Le design de ces aimants doit répondre à plusieurs contraintes:

- Un champ maximum au centre de l'entrefer de 1,6 T.
- Un rayon de courbure de 12,5 m.
- Une grande ouverture angulaire horizontale et verticale (± 190 mm x ± 70 mm).
- Une intégrale de champ magnétique homogène à $\pm 3{,}10^{-4}$ dans toute la zone utile.

Ces dipôles sont dits « superferriques » car la culasse en acier qui assure classiquement la fermeture du flux gouverne ici directement la qualité du champ magnétique. Le bobinage est réalisé en utilisant un brin en NbTi soudé dans une goulotte en cuivre afin d'assurer une plus grande stabilité et une meilleure protection en cas de transition brusque de l'état supraconducteur vers l'état résistif. La masse froide, refroidie à 4,2 K, est composée de deux bobines de forme trapézoïdale insérées dans un boitier en acier qui sert à la fois de structure mécanique pour reprendre les efforts magnétiques et de réservoir pour l'hélium liquide. L'ensemble est entouré d'un écran en cuivre refroidi avec de l'hélium gaz à 80 K et le tout est inséré dans un cryostat en acier inoxydable. Au cours des deux dernières années, le service a élaboré un design complet en s'inspirant des résultats obtenus sur un premier prototype conçu, fabriqué et testé dans le cadre d'une contribution Chinoise au projet Fair. Le SACM a également préparé les spécifications techniques destinées à l'appel d'offre prévu par Fair en 2017. Enfin, nous avons en charge la conception des 24 chambres à vide qui seront fabriquées à Novossibirsk dans le cadre de la contribution Russe au projet Fair et il participera à l'intégration finale sur le site de Darmstadt. L'installation du dernier aimant au sein du complexe Fair est prévue en 2021.







À gauche : Vue des deux bobines supraconductrices en jaune.
Au centre : Vue du cryostat et des 8 supports qui connectent la masse froide (4 K) au cryostat (300 K).
À droite : Vue de l'aimant complet avec sa culasse ferromagnétique (en orange). La tour cryogénique située sur la partie gauche permet les connexions externes avec le système cryogénique, le pompage, l'instrumentation et l'alimentation électrique. La masse totale est de 40 tonnes.

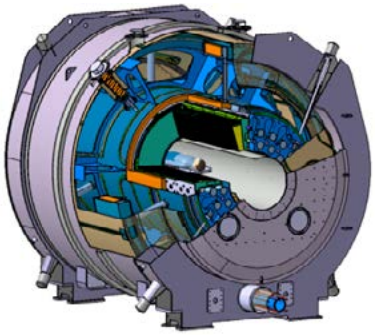
LE SYSTÈME À HAUT CHAMP 11.7 T ISEULT POUR LA PLATE-FORME NEUROSPIN

L'aimant corps entier et l'antenne radiofréquence 11,7 T, développés dans le cadre du projet Iseult ; seront installés à Neurospin en 2017. Ces deux équipements repousseront les limites de l'imagerie cérébrale. L'aimant est en cours de réalisation chez GE (ex-Alstom) à Belfort et une première antenne réseau 7 T composée de 8 voies a été construite et testée à Neurospin. Une nouvelle antenne 12 voies se trouve actuellement en phase de test. L'antenne 11,7 T pour le projet Iseult à est déjà construite selon le même schéma.

QU'EST-CE QUE LE PROJET ISEULT ?

La technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil de diagnostic et de recherche pour les neurosciences. Dans ce contexte, le centre Neurospin du CEA Saclay accueillera en 2017 un imageur par résonance magnétique IRM 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, permettront de progresser dans la connaissance du cerveau tant sur le plan fondamental des sciences cognitives que sur le diagnostic des maladies neurodégénératives 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 General Electric (GE).

Coupe de l'aimant 11,7 T : en orange les bobinages, en bleu la structure à 1,8 K et en violet le cryostat.



Vue de l'empilage des 170 doubles galettes.

LES DÉFIS D'ISEULT

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

- 1. Grande intensité de champ (intensité de 11,75 T, soit plus de 200 000 fois le champ magnétique terrestre).
- 2. Grand volume Autile (imagerie du corps entier et plus spécifiquement du cerveau, soit un volume de quelques litres environ 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).
- 3. Stabilité temporelle (obtenir un champ magnétique qui ne varie pas plus que d'un milliardième de tesla durant 10 minutes).
- 4. Homogénéité du champ de 5.10^{-7} T sur le volume d'étude que représente le cerveau du patient.
- 5. Confinement du champ magnétique dans la salle d'expérience (blindage actif par un second bobinage).

Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils supraconducteurs en nobium titane parcourus par un courant de 1 483 A stable à quelques 0,05 ppm/hr et bobinés en double galettes. Ce supraconducteur est maintenu à de très basses températures (1,8 K soit -271 °C) à l'aide de 5 000 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, entre autres, la réalisation de prototypes et de stations d'essais spécifiques.

DES ANNÉES DE R&D

De 2008 à 2012, une série de huit petits et grands prototypes spécialisés ou station d'essais ont été réalisés, testés et analysés pour démontrer les principes de montage et vérifier les capacités du conducteur à fonctionner aux contraintes nominales de champ magnétiques et de forces.
On citera le prototype appelé R1 réalisé à partir d'un assemblage de 6 doubles galettes, de rayon intérieur 185 mm et extérieur 240 mm, et pouvant générer un champ de 3,5 T à 5 000 A. Chaque double galette est réalisée à partir de 11 tours du conducteur final d'Iseult et utilise les mêmes composants et procédures de fabrication que l'aimant final. Les objectifs du prototype R1 étaient d'appliquer un niveau de contrainte mécanique supérieur à celui que verra l'aimant Iseult, de mesurer le courant critique du conducteur à 4,2 K pour un niveau de contrainte mécanique équivalent à celui d'Iseult soit 170 MPa, et acquérir de l'expérience dans le bobinage du conducteur Iseult et dans la réalisation des jonctions électriques. Ce prototype a atteint avec succès la contrainte azimutale de 225 MPa conducteur, bien supérieure à la contrainte nominale attendue sur Iseult.
Un autre prototype H0, un solénoïde d'un tonne constitué de 24 doubles galettes de 480 mm de rayon intérieur et produisant un champ de 1,5 T, a permis de démontrer que la technique de bobinage inventée pour Iseult permettait d'atteindre l'homogénéité de champ spécifiée. Ce prototype a permis également de valider le dispositif de

stabilisation de champ inventé également pour Iseult en collaboration avec le CNRS. 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 1er février 2012 par Alstom des 170 doubles galettes de série.

UNE AVENTURE INDUSTRIELLE

À partir de 2009, la conception détaillée de l'aimant a été enclenchée conduisant à plus de 3 000 plans. Une fois les plans d'un ensemble terminé, leur réalisation a été sous-traitée à travers chez des industriels spécialisés. Nous pouvons citer Luvata Waterbury Inc. (US) pour la production des 190 km de conducteurs supraconducteurs, Zanon (IT) pour la réalisation des enceintes cryogéniques et de vide, Roechling (FR) pour la réalisation des 1 360 plaques intercalaires usinées à +/-0,05 mm, Cryodiffusion (FR) pour la réalisation du satellite, du caloduc et de la ligne cryogénique, Air Liquide (FR) pour la réalisation du liquéfacteur, Jemma (SP) pour l'alimentation stabilisée.
Une fois réalisées, les pièces de l'aimant ont été livrées chez Alstom, le partenaire du projet en charge du bobinage et de l'intégration de l'aimant. Les éléments externes, cryogénie et électronique de mesure, de commande et de puissance, ont été livrés sur le site de NeuroSpin.

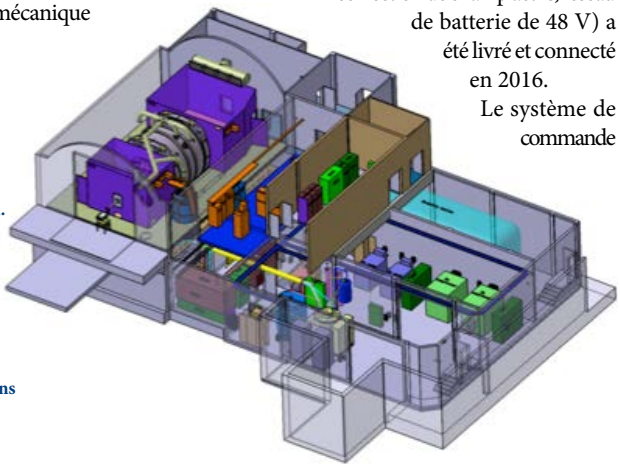
LA RÉALISATION DE L'AIMANT À ALSTOM/BELFORT

La construction a débuté avec le bobinage des 170 doubles galettes de 2 m de diamètre externe. Les tolérances dimensionnelles extrêmement fine, épaisseur du cheveu, requises pour l'IRM ont été obtenues grâce au développement d'une machine à bobiner dédiée contrôlée par ordinateur. En parallèle, les deux bobines de blindage actif de 10 tonnes chacune ont été bobinées sur leur mandrin. En 2014, l'intégration des bobines de blindage et des doubles galettes dans leur structure mécanique froide a débutée.

On notera que l'empilage des 170 doubles galettes a été contrôlé au laser pour aboutir à un alignement à mieux que le millimètre sur quatre mètres de hauteur.
En 2015, la masse froide a été finalisée avec l'insertion de la structure porteuse des bobines de blindage autour des doubles galettes.
En 2016, l'enceinte hélium a été fermée puis mise à l'horizontale. Les dernières étapes avant la livraison de l'aimant début 2017 sont la mise en place de l'écran thermique et de l'enceinte à vide.
L'aimant de 132 tonnes sera alors transporté à NeuroSpin. Les étapes de ce convoi exceptionnel sont : Strasbourg, passage sur le Rhin pour Anvers, passage sur la Manche pour le port de Corbeil, et livraison à NeuroSpin.

LA PRÉPARATION DES ÉQUIPEMENTS À NEUROSPIN

Le système cryogénique est conçu pour refroidir l'aimant (21 W@1,8 K ; 0,125 MPa et 610 W @ 55 K) 24 heures par jour et 365 jours par an. Il est déjà été installé dans les sous-sols de Neurospin. Il comprend en particulier un liquéfacteur d'Air Liquide livré en 2010 et le Satellite cryogénique. Ce dernier est un organe essentiel qui sert d'interface entre le liquéfacteur, les alimentations et l'aimant, et intègre l'échangeur 1,8 K BP/HP qui assure le fonctionnement en bain superfluide pressurisé.
Le circuit de puissance à courant continu comprend deux convertisseurs de puissance. Le premier permet la montée de l'aimant au courant nominal de 1 483 A. sous 40 V et le second alimente ensuite en permanence l'aimant à l'intensité nominale en mode stabilisé. Ces deux alimentations ont été livrées, testées puis installées à NeuroSpin en 2015. L'ensemble du circuit électrique de puissance (40 diodes de roue libre, résistance de protection d'une tonne, contacteurs de puissance, 9 alimentations stabilisée de 40 A pour les canaux de correction de champ actifs, réseau de batterie de 48 V) a été livré et connecté en 2016.
Le système de commande de l'aimant qui gère les alimentations, le liquéfacteur, les vannes cryogéniques, et les niveaux de température a été développé par le CEA sur la base d'automates à haute fiabilité. Il comprend plus de 300 capteurs et actionneurs.
Le système d'acquisition qui permet d'acquérir les données tant cryogéniques qu'électriques a également été spécialement développé par le CEA pour une mise en service en 2016.
Le système de détection de quench basé sur la mesure des tensions de l'aimant a nécessité un développement spécifique pour optimiser la fiabilité du système.



Vue d'ensembl de l'aimant Iseult et ses équipements auxiliaires dans le bâtiment NeuroSpin.
1 : Aimant
2 : Cages de Faraday
3 : Satellite
4 : Résistance de décharge et PCL
5 : Système de commande et PCS
6 : Équipements Siemens
7 : Liquéfacteur
8 : Pompes hélium
9 : Compresseurs

LE FUTUR

En 2017, l'aimant et tous les équipements associés seront en phase de mise en service à NeuroSpin. Les premières images qui vont utiliser les antennes RF développée dans un laboratoire commun entre le SACM et NeuroSpin devraient être produites un an après le début de la mise en service.

Vue de l'enceinte hélium après retournement.

Vue de l'insertion de la structure porteuse des bobines de blindage autour de l'aimant principal constitué des 170 doubles galettes.

LE DÉVELOPPEMENT DES ANTENNES POUR L'IRM

Depuis 2008, le développement des antennes de l'IRM à très hauts champs dans le cadre du projet Iseult a permis de nombreuses innovations, validées sur un scanner 7 teslas déjà opérationnel au centre NeuroSpin. Ces innovations, protégées par des brevets, concernent :

- La technologie des antennes, à savoir la configuration des éléments d'émission et de réception, le routage des signaux radiofréquence et le découplage entre éléments.
- Les méthodes d'imagerie utilisées en transmission parallèle (kT-points, impulsions universelles).

On peut ainsi obtenir une excitation uniforme des spins des noyaux d'hydrogène grâce à une antenne réseau afin de compenser l'inhomogénéité du champ magnétique associé à l'onde électromagnétique. Cette inhomogénéité se manifeste pour une fréquence supérieure à 200 MHz pour la tête humaine, c'est-à-dire au-delà d'un champ statique de 3 teslas.

Grâce à un financement Astre, accordé par le Conseil général de l'Essonne, les développements se sont poursuivis avec la mise au point d'une antenne (image de gauche) équipée de 11 résonateurs linéaires et d'un résonateur de type disque, tous utilisés à la fois en émission et en réception ; le disque permet un éclairage significativement plus efficace du sommet de la tête (image de droite). Dix résonateurs en forme de boucle complètent cet ensemble pour augmenter la sensibilité en réception, garante d'une résolution élevée des images. Les mesures réalisées à 7 teslas sur cette antenne ainsi équipée de 22 éléments de réception ont montré une sensibilité supérieure à celle d'une antenne commerciale non compatible avec la transmission parallèle, mais équipée de 32 éléments de réception. Pourtant, il est généralement admis que la sensibilité augmente avec ce nombre. Nos développements ouvrent donc la voie à d'autres possibilités d'optimisation de la sensibilité d'une antenne sans passer par l'augmentation du nombre d'éléments dédiés à la réception. Ils valident également les brevets déposés sur la construction des antennes et seront facilement transposables à 11,7 teslas pour le projet Iseult. Fin 2013, une équipe mixte entre l'I2BM et l'Irfu a été créée pour pérenniser les compétences et les élargir vers les antennes précliniques, destinées aux rongeurs et primates infrahumains, en particulier celles utilisées en modes multi-noyaux pour l'IRM fonctionnelle.

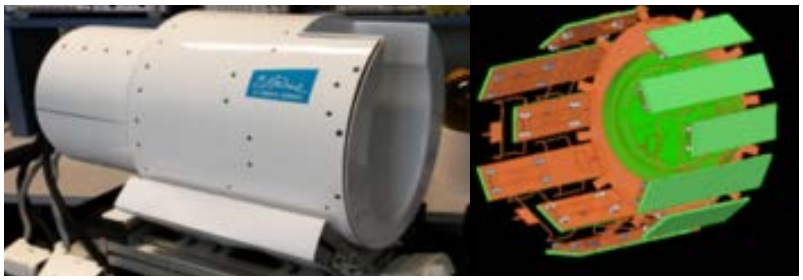
Parallel-transmission-enabled magnetization-prepared rapid gradient-echo T1-weighted imaging of the human brain at 7 t, M. A.Cloos et al., NEUROIMAGE Volume 62, Issue 3, page 2140.

Latest Progress on the Iseult/Inumac Whole Body 11,7 t MRI Magnet, P. Vedrine et al., IEEE Transactions on applied superconductivity, Volume 22, Issue 3, June 2012

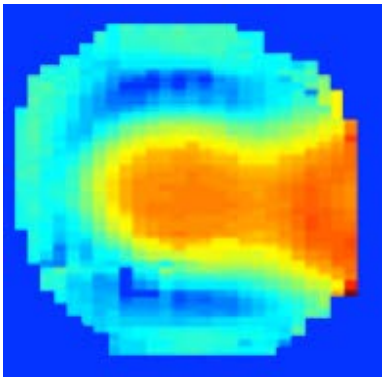
FR0554152, FR2944877, FR1051301, FR1050905

Oséo convention d'aide n° 2006 00 120 PMII Iseult/Guerbet

Iseult Inumac



Antenne 7 teslas financée par Astre (12 éléments d'émission alimentés par 8 sources radiofréquence, 22 éléments en réception).



Éclairage en angle de bascule des spins, obtenu sur la zone équivalente au sommet d'une tête (partie droite) grâce au résonateur disque.

LA BOBINE SUPRACONDUCTRICE POUR L'AIMANT HYBRIDE DU LNCMI

Cryogenic design of the 43 T LNCMI Grenoble hybrid magnet. Hervieu et al [2015]; Final Design of the New Grenoble Hybrid Magnet; Fazilleau et al [2012]

FR2991809_A1

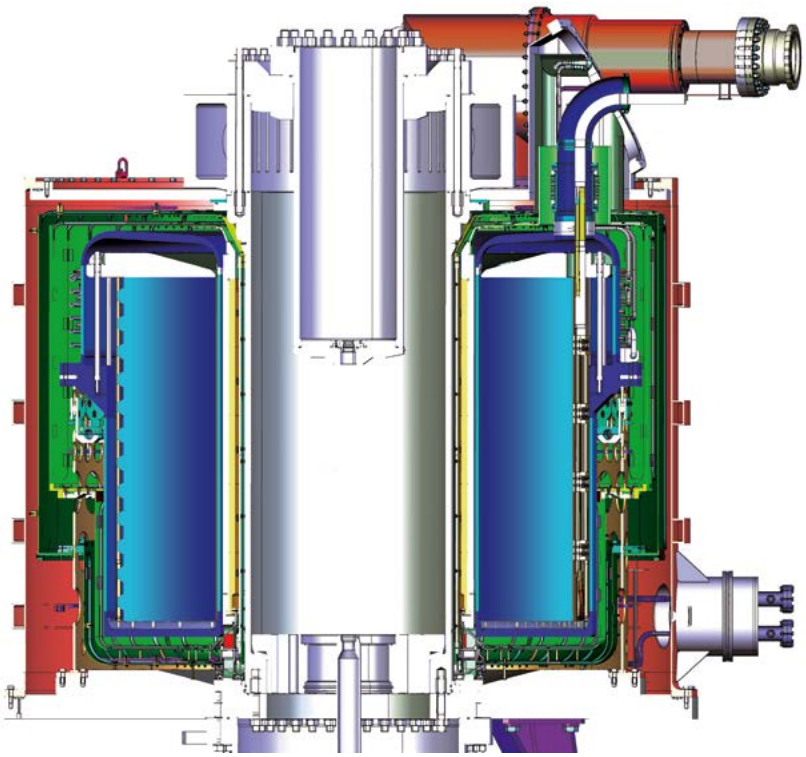
Investissements pour l'avenir LaSUP (Large Superconducting User Platform), CNRS et EU-FP7-Infrastructure-2008-1, EuroMagNET II, Grant agreement number 228043

L'aimant hybride du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses de Grenoble (LNCMI) est une combinaison de la bobine supraconductrice de 8,5 teslas étudiée à l'Irfu et de bobines résistives étudiées et réalisées par le CNRS. Dans le cadre de la collaboration établie entre le LNCMI et l'Irfu nous avons réalisé l'ensemble des études magnétiques, mécaniques et cryogéniques pour la réalisation de l'aimant supraconducteur. L'aimant hybride générera un champ continu de 43 teslas dans un diamètre de 34 mm. Les premières réalisations ont débuté fin 2015 et vont se poursuivre pendant les 3 années qui viennent.

La bobine sera formée de 37 doubles galettes empilées verticalement et connectées en série pour constituer un solénoïde. Le câble supraconducteur en niobium titane, composé de 19 brins, sera inséré dans un profilé creux en cuivre qui, à la fois, assure la stabilité énergétique de l'aimant via l'hélium superfluide présent dans le canal, rigidifie sa structure mécanique et donne la section nécessaire pour protéger l'aimant des surtensions en cas de transition résistive. Un écran massif refroidi à 30 K atténue l'effet des courants de Foucault générés par les aimants résistifs sur l'aimant supraconducteur pendant les phases de montée ou de descente du champ magnétique.

Les niveaux d'énergie et les efforts considérables potentiellement générés dans le cas accidentel extrême (déséquilibre magnétique créé par la perte de la moitié supérieure ou inférieure des aimants résistifs) ont nécessité un surcroit d'études important pour assurer le niveau de sûreté nécessaire. En effet, l'aimant supraconducteur devra résister à des niveaux de contraintes mécaniques et électriques très élevés en cas de perte accidentelle d'une partie des aimants centraux résistifs. Il est étudié et dessiné pour supporter des chocs verticaux supérieurs à 4 fois le poids de la masse froide (soit 100 tonnes) et encore 4 à 5 fois plus élevées pour l'écran des courants de Foucault et le tube central. L'extension du concept innovant initialement développé pour Miri et la mise au point de supports cryomécaniques ont fait l'objet d'un dépôt de brevet. Les composants de l'installation sont dimensionnés en cryomécanique et en thermo-hydraulique pour respecter les normes de sécurité et permettre une évacuation efficace de l'hélium superfluide pressurisé à 1,8 K et 1 200 hPa en cas accidentel. Le SIS a également étudié l'électronique de protection de l'aimant et suivi la réalisation de ses composants. Au terme de ces trois années d'études, les principes de fonctionnement et la conception ont été validés en collaboration avec un comité d'experts et nous entamons la phase des réalisations. Le câble supraconducteur a déjà été réalisé. Il sera inséré dans sa goulotte de cuivre au LNCMI en 2016 pour constituer le conducteur nécessaire au bobinage des 37 doubles galettes. Les réalisations liées aux outillages de bobinage vont débuter dans l'industrie. En parallèle le SACM et le SIS terminent la préparation des documents techniques d'appel d'offre pour le cryostat, la ligne de transfert technique des fluides et du courant et le satellite déporté qui compléteront l'installation.

Coupe de l'électroaimant supraconducteur LNCMI, en dégradé de bleus, cryostaté et fortement maintenu à la plaque infeure pour contenir les efforts en cas de déséquilibre magnétique accidentel.



L'AIMANT WAVE

L'aimant Wave Neutrons est un équipement innovant développé pour des expériences de diffusion de neutrons dans le cadre d'une collaboration entre DSM/Iramis/LLB et DRF/Irfu/SACM. Cet équipement est conçu pour pouvoir être installé sur les aires expérimentales du Laboratoire Léon Brillouin auprès du réacteur Orphée à Saclay.

PERFORMANCES DEMANDÉES PAR LES UTILISATEURS

Les performances de l'aimant demandées par les physiciens du LLB sont la création d'un champ magnétique pouvant varier continûment de 0 à 1 tesla, orientable dans les trois directions de l'espace, et homogène à mieux que 1000 ppm sur toute la zone échantillon, qui est une sphère de 5 mm de rayon (zone d'interaction avec échantillon). L'espace doit rester accessible aux détecteurs neutroniques dans un espace de 75 mm de part et d'autre du plan équatorial, et angulairement sur 110° de part et d'autre de l'axe du faisceau incident dans ce plan.

Les échantillons analysés par diffraction viennent dans leur propre cryostat, qui doit pouvoir être inséré par le dessus au cœur de l'aimant Wave. À cet effet un puits central échantillon d'un diamètre d'au moins 100 mm doit être aménagé.

GÉOMÉTRIE DE L'AIMANT

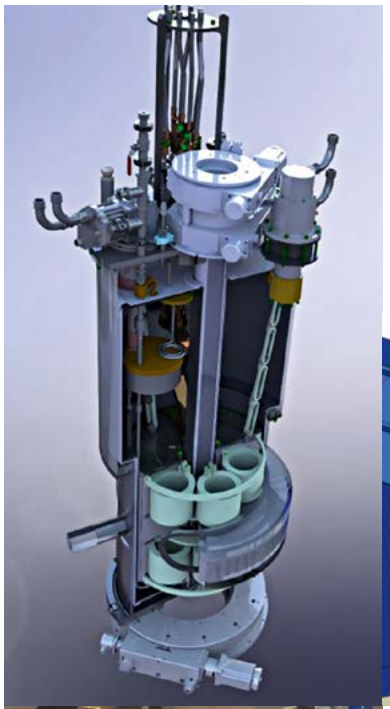
Ces conditions sont obtenues par le design qui a donné lieu au brevet en 2012. La génération de la composante verticale du champ est confiée à une paire de bobines du type « bobines d'Helmholtz » (en vert sur le 3D), disposées horizontalement de part et d'autre du plan équatorial, et centrées sur le puits échantillon. Ces bobines sont blindées par deux autres bobines de compensation. À noter que les bobines de blindage participent aussi à l'homogénéité du champ au niveau de l'échantillon. La composante horizontale du champ, est créée par les champs de fuite émanant de 12 bobines disposées sur 2 hexagones (haut et bas) et alimentées en opposition.

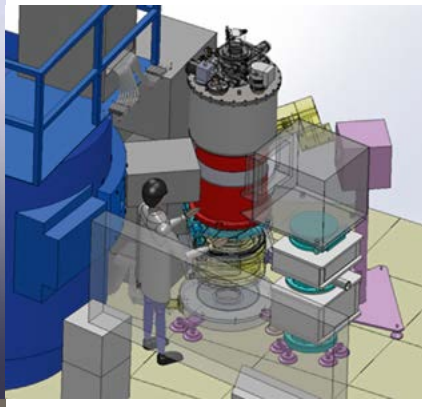
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Les 16 solénoïdes sont bobinés avec un supraconducteur NbTi de 0,68 mm par 1,08 mm, imprégnés et encastrés dans un boîtier en aluminium. Ce boîtier est refroidi indirectement par de l'hélium liquide circulant dans une boucle thermosiphon dont le réservoir est refroidi par un cryogénérateur, selon le principe du « thermautonome » étudié au SACM. Les bobines Wave sont alimentées par quatre alimentations indépendantes de 200 A via des amenées de courant en supraconducteurs HTS. Elles sont protégées par des diodes froides. Le cryostat et tous les équipements sont représentés ci-contre.

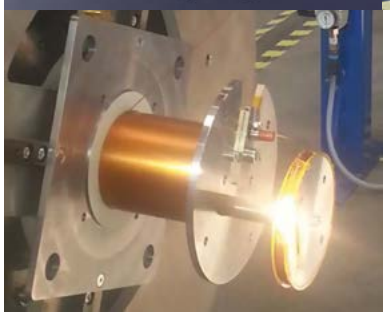
L'AIMANT WAVE NEUTRONS

Il a été commandé « clefs en mains » à la société Sigmaphi. La livraison à Saclay est prévue en juin 2017. Le projet est soutenu par la Région Ile-de-France à travers le NanoK-2014-ML-005.





Visualisation de l'aimant Wave sur l'aire expérimentale du LLB et vue éclatée du cryostat.



Bobine prototype réalisée chez Sigmaphi.

Development of an innovative Wide Aperture Vector Magnet. C. Berriaud, G.Aubert, A.M. Bataille, P. Bredy, A. Daël, J.-M. Rifflet, S. Klimko, P. Lavie, J.-L. Meuriot, A.Peugeot, T. Robillard. Conference Magnet Technology MT24 Seoul

Brevet français #1262070 + extension US

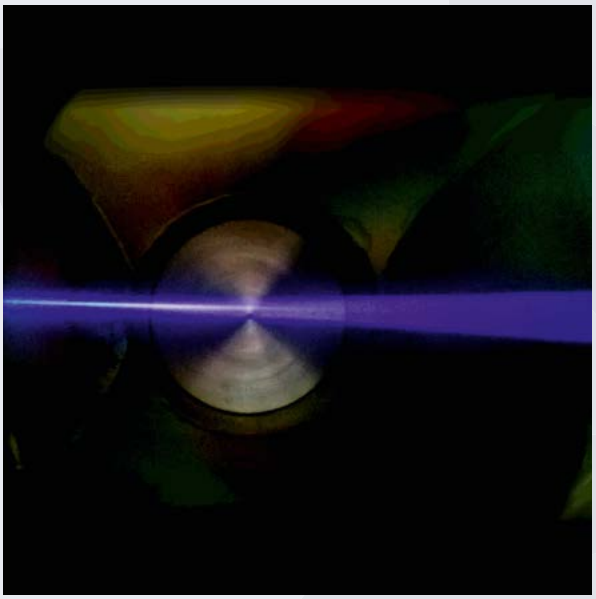
Projet financé à 66%par l'inter-DIM Nano K (Conseil régional Ile de France) ANR Wave Next

Iramis LLB , Soleil, Institut Neel et Sigmaphi dans le cadre du Consortium de l'ANR Wave Next

les ACTIVITÉS et PROGRAMMMES

SACM **2013-2015**

R&D et développements technologiques



R&D SUR LES CAVITÉS SUPRACONDUCTRICES À RADIOFRÉQUENCES

Aujourd'hui, le matériau incontournable pour la fabrication des cavités accélératrices à radiofréquences (RF) est le niobium, qui permet d'obtenir les meilleures performances. Dans les cavités, la supraconductivité est un phénomène localisé à la surface extrême du matériau, les 50 premiers nanomètres, qui doivent être exempts de défauts cristallins, chimiques ou morphologiques. La R&D sur les traitements de surface vise à mettre au point des techniques de traitement optimales (nettoyage, polissage, traitement thermiques), si possible transférables au milieu industriel. Un des procédés étudié est le polissage électrochimique des cavités qui permet aujourd'hui d'obtenir les champs accélérateurs les plus élevés. Ce procédé a été utilisé pour traiter les cavités conçues pour les applications à haute intensité.

Il est également important de localiser et identifier les défauts qui font transiter le niobium à l'état normal (*quench*). L'étude de la propagation des ondes thermiques dans l'hélium superfluide permet de simplifier la localisation du quench en limitant le nombre de capteurs.

Les performances obtenues avec le niobium sont aujourd'hui proches des optimaux théoriques. Le développement de matériaux nanocomposites (alternance de supraconducteurs et d'isolants) permettrait d'augmenter le champ magnétique théorique acceptable et donc le champ accélérateur pour les accélérateurs futurs. Un choix judicieux du supraconducteur permettrait de plus d'abaisser les pertes.

POLISSAGE ÉLECTROCHIMIQUE

La station d'électropolissage des cavités elliptiques en position verticale (réceptionnée en 2011) a été améliorée pour assurer le traitement de la cavité SPL dans le cadre du programme Eucard. La configuration verticale est particulièrement adaptée au traitement de ces résonateurs multicellules imposants (1,3 m, volume de 90 l), tout en assurant la sécurité des opérateurs. La cavité SPL a atteint un champ de 20 MV/m après traitement thermique, ce qui constitue une performance de référence pour ces structures. L'expérience à montré une asymétrie du procédé.

Cavité SPL en cours de traitement électrochimique.

Un dispositif permettant d'observer l'intérieur d'une cavité mono-cellule pendant traitement a été mis au point. La visualisation des fluides, et notamment du dihydrogène est ainsi possible. Des zones de stagnation de l'hydrogène sur la partie supérieure de la cellule sont constatées et la situation a été améliorée par l'utilisation de gaines maillées en Téflon pour piéger le gaz autour de la cathode. De plus la cavité est retournée à mi-traitement.

Montage avec fenêtre transparente étanche aux acides permettant d'observer l'intérieur d'une cavité monocellule pendant traitement.

LOCALISATION DU QUENCH PAR LA MÉTHODE DITE *DE SECOND SON*

L'échauffement localisé dû au quench crée, dans l'hélium superfluide, une onde de chaleur de type *second son* qui peut être captée par des OST (Oscillating Superleak Transducers). La mesure du temps de parcours résultant doit permettre, par triangulation, de localiser le quench. Nous avons utilisé cette méthode sur de multiples tests de cavités monocellules, où la position du quench était précédemment repérée par mesure de température sur la

Applied Physics Letters, C. Antoine et al., 2013; 102(10):102603, PRST-AB, 17, 083501 (2014), F. Eozenou et al.

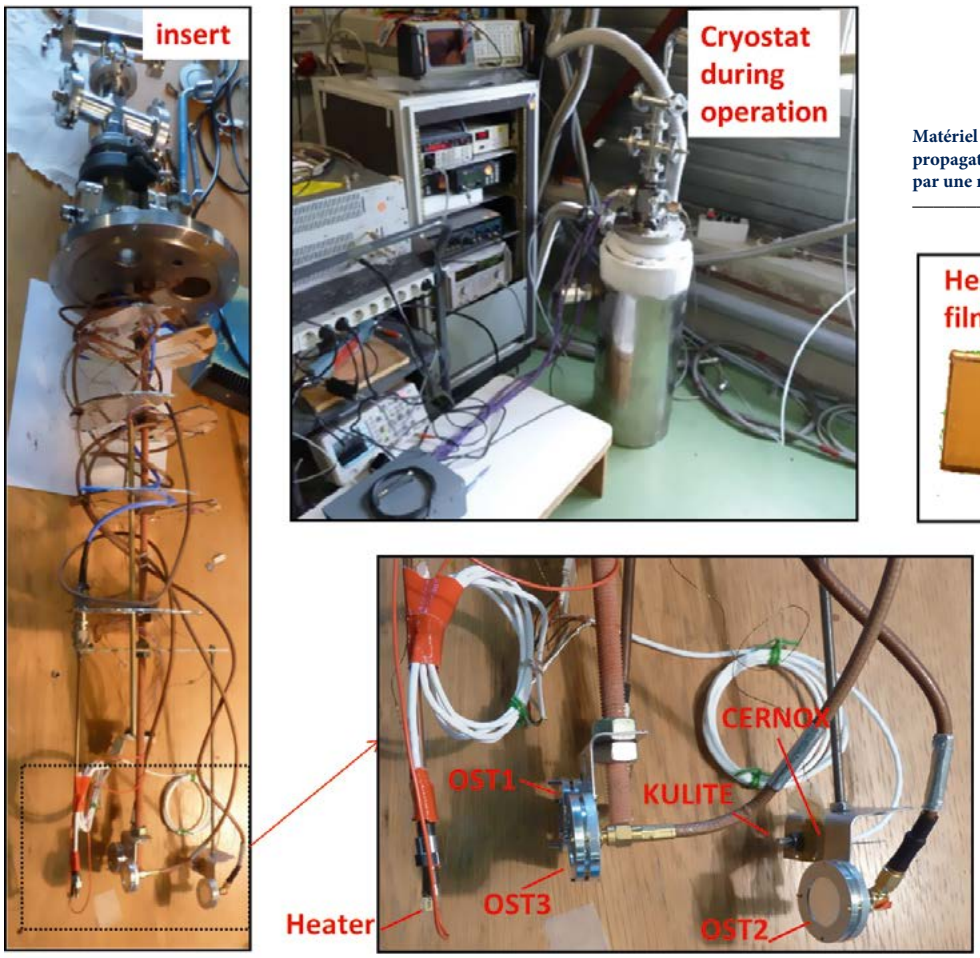
Eucard2, Astre

surface externe des cavités. Un décalage avec le modèle d'une onde de *second son* émise ponctuellement et se propageant à la vitesse prédite a systématiquement été mesuré : les temps de parcours de l'onde sont plus courts que ceux attendus. Les hypothèses à l'étude sont notamment : une zone de quench étendue (quelques centimètres carrés) plutôt que ponctuelles, ou alors le changement de phase, voire l'ébullition de l'hélium près du quench, qui ferait perdre le caractère purement « *second son* » de l'onde de chaleur. Nous avons décidé de tester cette dernière hypothèse en mesurant le temps d'arrivée d'une onde de *second son* émise par une résistance de petite taille (34 mm^2). La puissance émise, sous forme de pulse a été mesurée, jusqu'à des valeurs de plus d'un kilowatt. Ce qui montre que le modèle de l'onde du *second son* reste valable dans le cas d'une source quasi ponctuelle même à fort flux.

Durant ces mesures, le temps de parcours de l'onde de chaleur est en adéquation avec la prédiction, et ce pour tout niveau de puissance. Il semble donc que d'autres aspects de la dynamique du *quench* soient à prendre en compte pour appréhender précisément les phénomènes à l'interface niobium/hélium, et expliquer les temps de parcours mesurés lors de tests de cavités.

DÉVELOPPEMENT DE SUPRACONDUCTEURS NANOCOMPOSITES

Les premiers résultats publiés par le SACM, prouvant la validité de ce concept proposé par le théoricien A. Gurevich en 2006, ont maintenant été confirmés par plusieurs laboratoires travaillant sur ce sujet dans la communauté internationale. La difficulté principale pour l'optimisation de ces structures est de pouvoir mesurer rapidement les performances d'un grand nombre d'échantillons. Pour cela nous avons développé un magnétomètre spécifique qui devrait permettre d'atteindre des champs ~ 10 fois plus élevés que les appareils similaires existants, et ce dans des gammes de températures correspondant aux conditions d'utilisation des cavités, y compris à T<2 K. Le champ à partir duquel les dissipations apparaissent permet de prédire l'amélioration espérée en champ accélérateur.. L'autre paramètre important (résistance de surface RF) demande aussi le développement de cavités spéciales « échantillons » qui se font actuellement dans le cadre de collaborations. Le Service est également impliqué dans plusieurs collaborations portant sur le dépôt d'échantillons multicouches par plusieurs méthodes différentes et leur caractérisation, dont les principales sont : IN2P3/CSNSM : dépôt de couches par « Molecular Beam Epitaxy » (MBE), et caractérisation RF des couches par cavité TE011 ; Eucard2 WP12.2 « thin films », avec le dépôt à l'INP Grenoble de couches par « Atomic Layer Deposition » (ALD) ou sputtering (Cern), et caractérisation (magnétométrie à Saclay et caractérisation RF par cavité quadripôle à HZB) et enfin KEK pour les développements théoriques.



Matériel utilisé pour l'étude de la propagation de l'onde thermique émise par une résistance.

DYNAMIQUE DES FAISCEAUX DE PARTICULES

La dynamique des faisceaux peut se définir comme l'étude du mouvement de particules chargées dans des champs électromagnétiques statiques ou dépendant du temps.
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 nombreux et divers. Sur le plan fondamental, l'interaction avec le gaz résiduel, l'interaction avec les interfaces solides, la dynamique des plasmas des sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électromagnétiques d'ordre élevé (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 et le développement de codes de calcul et de méthodes numériques utilisant au mieux les ressources informatiques. Les confrontations expérimentales permettent ensuite de valider et d'améliorer les modèles utilisés.

SIMULATION DU FAISCEAU DANS LES SOURCES À RÉSONANCE CYCLOTRONIQUE ÉLECTRONIQUE

Le Service développe des sources ECR (Electron Cyclotron Resonance) d'ions légers depuis les années 90, principalement pour des accélérateurs. Notre premier modèle d'ECR, la source Silhi, est capable de générer jusqu'à 100 mA de protons ou de deutons. Depuis, différentes sources ont été construites selon les besoins des projets (Spiral2 à Ganil, Fair à GSI, Ifmif-LIPAc à Rokkasho). Ainsi, une grande variété de paramètres ont été explorés avec des courants extraits allant de 5 mA à 140 mA, des énergies de faisceau allant de 20 keV à 100 keV, en continu ou en pulsé, avec différentes configurations magnétiques (bobines ou aimants permanents).
L'optimisation des sources ECR est un point clé et beaucoup d'efforts ont été déployés pour rendre les sources plus compactes, moins chères et plus performantes. La source d'ions Alises a été développée dans ce but. L'influence de différents paramètres comme le rayon ou la longueur de la chambre plasma a été étudiée, donnant au SACM une expertise reconnue dans ce domaine.
En parallèle, l'étude de telles sources en termes de modélisation et de simulations est un sujet important. Cela a permis de comprendre des problèmes observés expérimentalement et donc d'améliorer l'efficacité des sources ECR. Cependant, les outils actuels présentent encore des limites et des zones d'ombre demeurent sur la compréhension de certains phénomènes comme l'influence du rayon de la chambre plasma. La modélisation de la chambre plasma reste délicate du fait de la neutralité du milieu, du fort couplage onde-plasma, des collisions dans le plasma et des conditions aux limites (extraction du faisceau). C'est pourquoi nous avons commencé un programme de R&D sur la modélisation de la dynamique du plasma, en partenariat avec l'entreprise Pantechnik.

TRANSPORT DE PARTICULES DANS LES LIGNES À BASSE ÉNERGIE

L'un des défis actuels des accélérateurs de haute intensité (puissance faisceau de l'ordre du MégaWatt) est la dynamique du transport des faisceaux dans les lignes de basse énergie (LBE). Cette dynamique est dominée par le champ de charge d'espace (un champ électromagnétique auto-induit par le faisceau) qui est en général non linéaire et peut induire des phénomènes de halo, de grossissement d'émittance et de pertes de faisceau. Heureusement, un faisceau se propageant dans une ligne à basse énergie provoque l'ionisation du gaz résiduel présent dans celle-ci. Les particules secondaires ainsi créées (électrons ou ions) possèdant une charge opposée aux ions du faisceau vont alors compenser les effets de charge d'espace. Cependant la compensation de charge d'espace d'un faisceau n'est que partielle, elle n'est pas homogène dans l'espace et de plus, elle dépend du temps (présence d'un régime transitoire avant l'établissement

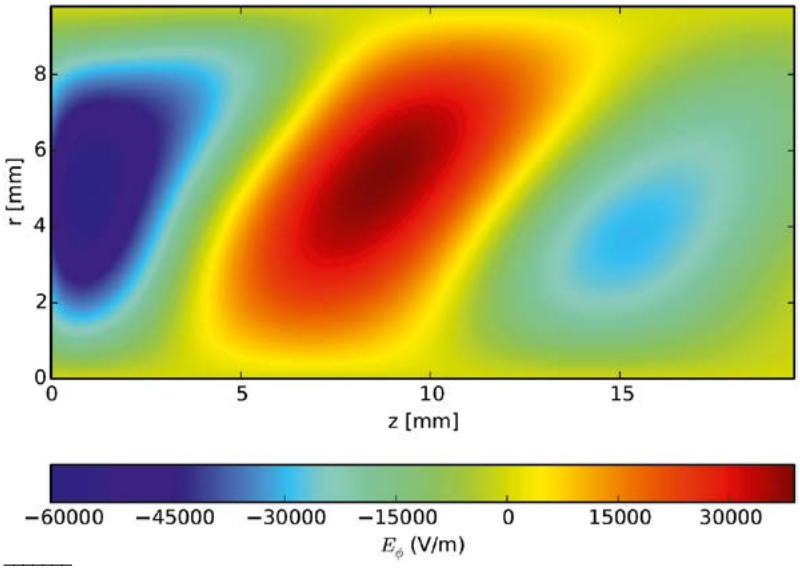
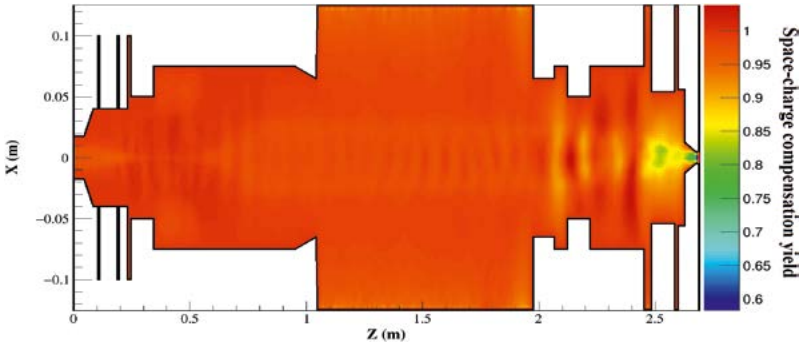


Illustration du couplage onde-plasma à la résonance ECR. La composante azimutale du champ électrique est représentée en niveau de couleurs. La simulation est réalisée en régime axisymétrique suivant l'axe z. En l'absence de plasma, l'onde est plane suivant z. La figure met en évidence le couplage onde-plasma.

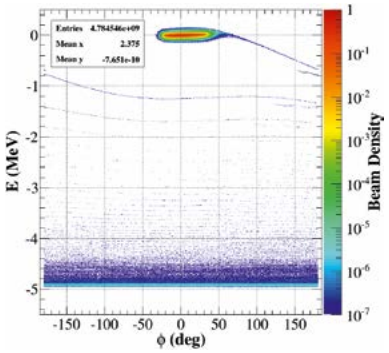


Compensation de la charge d'espace dans la ligne Be Myrte.

d'un état d'équilibre). Afin d'améliorer la compréhension du phénomène de compensation de charge d'espace il est nécessaire de réaliser des simulations numériques auto-consistantes, à l'aide de codes de calculs dédiées, comme le code WARP.
Des campagnes expérimentales sont également menées afin de disposer de données pour valider les résultats des modélisations numériques. Ainsi, des mesures des caractéristiques du faisceau des lignes basse énergie des accélérateurs linéaires de Myrrha du programme H2020 (voir simulation de la ligne BE ci-dessus), d'Ifmif-Lipac et du banc de test BETSI ont été réalisées pour différentes conditions expérimentales (type de gaz, pression, focalisation). L'ensemble de ces activités est effectué dans le cadre d'une thèse qui a débuté en novembre 2014.

TRANSPORT DE PARTICULES DANS LES PARTIES MOYENNE ET HAUTE ÉNERGIE

Au-delà du RFQ, les problèmes liés à la charge d'espace sont plus réduits mais le contrôle des niveaux de pertes du faisceau devient essentiel, pour des questions de puissance dissipée dans les parties cryostatiques et d'activation des structures. Le défi dans les machines de 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 au watt (voir graph ci-contre). Le Service 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, en tenant compte des erreurs de réglage et de construction. Des études de fiabilité doivent aussi permettre d'évaluer les effets d'une défaillance d'un ou 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



Distribution longitudinale à la sortie du RFQ de l'accélérateur Ifmif réalisée dans le cadre d'une simulation visant à simuler l'accélérateur avec le nombre réel de particules présentes dans un paquet, soit 4,7 10^9 particules. Une telle simulation a nécessité 170 processeurs durant 2 semaines et a demandé un espace de stockage de 40 téraoctets. On y voit en particulier la distribution des particules présentant un fort écart d'énergie c'est-à-dire décrochées du cœur, difficilement mises en évidence avec des simulations plus classiques.

compétences, citons Ifmif, Beta-Beams, Myrrha, Eurisol, Linac4, SPL, ESS, Spiral2, ILC, S3 pour les principaux.

ACCÉLÉRATION LASER-PLASMA

L'accélération plasma permet d'atteindre des gradients allant jusqu'à 100 GV/m sur des longueurs allant du millimètre au mètre selon les caractéristiques du laser utilisé. Des faisceaux d'électrons de plusieurs centaines de MeV peuvent alors être créés avec une source de quelques centimètres. Néanmoins, la qualité du faisceau en termes de charge, de spectre en énergie ou d'émittance ne permet pas à l'heure actuel de l'utiliser pour un collisionneur. C'est pourquoi une forte R&D est exercée dans ce domaine afin d'améliorer les propriétés du faisceau. Depuis quelques années, nous sommes impliqués dans le programme Cilex (Complexe Interdisciplinaire de Lumière Extrême), situé au CEA Orme des merisiers sur le plateau de Saclay et réunissant un grand nombre de partenaires de l'Université Paris-Saclay. Ce projet vise à créer un complexe autour d'un laser de 10 PW (un des plus puissants au monde) et d'un ensemble d'autres lasers. Nous participons à la réalisation de la ligne de transfert entre les 2 étages accélérateurs, qui permettra de mettre en évidence la possibilité d'une accélération multi-étages. Comme première pierre apportée à l'édifice, le SACM est également impliqué dans le projet Dactomus, une étape préparatoire pour développer l'injecteur. Le Service a participé à la mise en œuvre d'une ligne de caractérisation de la source d'électrons Elisa (divergence et spectre en énergie) sur le laser UHI100, un laser de proximité situé au CEA de Saclay. Enfin, nous sommes impliqués dans le projet européen H2020 EuPRAXIA, qui est une étude de design pour la création d'un accélérateur compact basé sur la technologie plasma. Le SACM participera à la fois à la simulation de l'accélération dans la chambre plasma et à l'étude des lignes de transfert des électrons entre les différents étages accélérateurs.

« UPGRADE » DU LHC

Dans le cadre du projet HiLumi LHC, nous contribuons aux études de dynamique faisceau, entreprises pour augmenter d'un facteur 5 la luminosité du LHC à l'horizon 2020. Grâce à l'approche dite « Achromatic Telescopic Squeezing » développée par S. Fartoukh du Cern, cette amélioration ne modifiera que deux régions d'interactions. Les quadripôles des triplets de focalisation finale, actuellement en technologie NbTi, devront être remplacés par des quadripôles utilisant la technologie Nb_3Sn. Elle nécessitera, aussi, l'utilisation de cavités radio fréquence, « crab cavity », à même de diminuer l'effet de l'angle de croisement des faisceaux sur la luminosité. Le SACM participe à la définition de la maille et a proposé une structure permettant de réduire de 25 % la tension requise pour les « crab cavities ». Nous sommes aussi impliqués dans les études de définition des tolérances pour les nouveaux éléments, reliées à la stabilité à long terme du faisceau.

Advanced concepts and methods for very high intensity accelerators, P. Nghiem, N. Chauvin, M. Comunian, C. Oliver, W. Simeoni, D. Uriot et M. Valette, Laser and Particle Beams, vol. 32, p. 639–649, 12 2014

Codes de simulation sous licence Irfu: TraceWin : http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/index3.php Toutatis : http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/index4.php

Cern, INFN, Ciemat, GSI, LPSC-Grenoble, IPNO, Soreq, SCk-CEN, NCBJ, ESS, JAEA, LAL, TUDa, KEK, Iramis/LIDyl, LPGP, LLR, LULI, Desy, UHH, Soleil

DÉVELOPPEMENT DES SOURCES ECR : LE CONCEPT ALISÉS

Development of a compact high intensity ion source for light ions at CEA-Saclay
Proceedings of Ecris 2016.
O. Delferrièrea, R. Gobin, Y. Gauthier, F. Harrault, O. Tuske. CEA/Saclay, DSM/Irfu, 91191-Gif/Yvette, France

Alisés for a new ECR ion source geometry at Saclay Rev. Sci. Instrum. 83, 02A307 (2012). ICIS 2011
O. Delferrière*, R. Gobin, F. Harrault, S. Nyckees, Y. Sauce, O. Tuske, CEA/Saclay, DSM/Irfu, 91191-Gif/Yvette, France

FR 15 56871

Depuis les années 90, l'Irfu a conçu, réalisé et fait fonctionner des sources ECR (Electron Cyclotron Resonance) d'ions légers de forte intensité pour différents projets comme Iphi, Spiral2, Ifmif, Fair.

Le principe des sources ECR est basé sur le chauffage des électrons par résonance cyclotronique électronique en présence d'une onde électromagnétique haute fréquence et d'un champ magnétique produit par un système de bobines ou d'aimants permanents. Dans le cas des sources Alisés, un magnétron industriel fournit l'énergie de chauffage à 2,45 GHz et un solénoïde produit le champ magnétique axial. La résonance se produit à l'intérieur d'une chambre d'ionisation (chambre plasma) dans laquelle un gaz hydrogène ou deutérium est injecté et subit une ionisation due à l'impact électronique des électrons chauds. L'ensemble étant porté à la haute tension, un orifice de quelques millimètres permet de produire un faisceau d'ions au moyen d'un système d'extraction multi électrodes qui assure à la fois la mise en forme et l'accélération du faisceau d'ions.

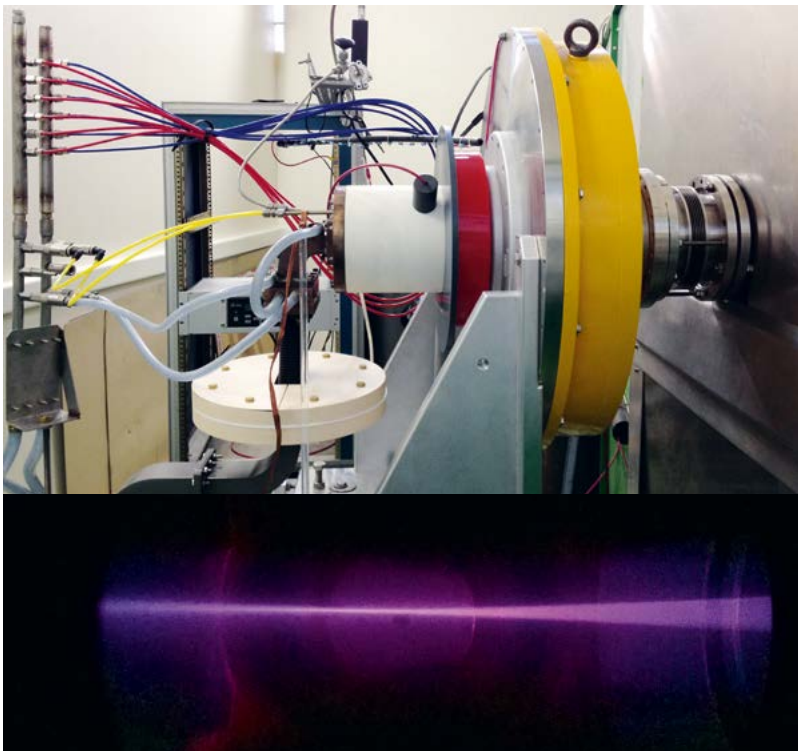
Les améliorations qui ont été apportées au cours des trois dernières années concernent principalement la géométrie du système d'extraction. L'objectif est d'obtenir une source compacte, constituée d'un assemblage de pièces simples de manière à avoir une maintenance aisée. Cette démarche nous conduit à la construction d'un premier prototype Alisés 1 pour valider le concept. Après des modifications importantes, la nouvelle source compacte Alisés 2 est maintenant opérationnelle.

ALISÉS 1 & 2

En 2011, nous avions développé une nouvelle source d'ions mono chargés de type ECR pour répondre en partie à la problématique des accélérateurs de forte intensité (de l'ordre de 100 mA), à savoir minimiser la longueur de la ligne basse énergie (LBE). La première version « Alisés 1 » a permis de tester plusieurs longueurs et diamètres de chambre d'ionisation permettant une réduction de la taille de la source mais aussi de s'affranchir de certaines difficultés liées à la plateforme haute tension en ayant un système magnétique au potentiel du laboratoire. Les améliorations apportées à cette première version ont permis de simplifier la géométrie de la source, de faciliter l'assemblage des différents éléments pour une maintenance plus aisée et aussi de réduire le coût global d'une source de ce type. Sur Alisés 2 la structure isolante fait partie intégrante du corps de source.

Depuis février 2015, Alisés 2 est installée sur le banc test Betsi. Le premier faisceau a été extrait en mars 2015 et, on extrait régulièrement un faisceau d'ions hydrogène de 35 mA à 42 kV (H^+ et autres ions moléculaires) au travers d'un trou de diamètre 6 mm, avec un record d'intensité extraite de 38,5 mA à 42 kV. La source fonctionne pour l'instant jusqu'à 50 kV en mode pulsé ou continu. Les réglages de la source sont parfaitement reproductibles.

Images Alisés 2 en cours de test sur le banc Betsi (bat 124 Hall 4E).



Faisceau de H+ d'intensité 40 mA.

FUTURS DÉVELOPPEMENTS VERS ALISÉS 3

Dans le cadre de l'upgrade de Betsi à 100 kV, Alisés 2 sera testée à plus haute tension. Nous avons déjà vérifié que la structure isolante est compatible avec une tension d'extraction de 70 kV. Des essais jusqu'à 100 kV sont prévus avec faisceau. La diminution de la taille de la source Alisés 2 a permis aussi de placer une bobine solénoïdale de diamètre plus faible autour de la structure isolante, en éliminant ainsi le solénoïde développé pour Alisés 1. Le projet de source Alisés 3 consiste à concevoir une source de dimensions encore plus réduites basée sur les résultats obtenus avec les deux premières versions, présentant un diamètre de chambre de 45 mm et utilisant un système magnétique plus compact.

ACCÉLÉRATION LASER PLASMA

Les secteurs de recherche dans le domaine de l'accélération laser étant nombreux, les activités du SACM se focalisent aujourd'hui sur l'accélération laser-plasma pour électrons qui devrait offrir dans le court et moyen-terme des perspectives d'application dans de nombreux domaines : sources de rayonnement X et gamma compacts, physique des hautes énergies, technologies pour la santé, etc.

En effet, l'accélération laser-plasma a montré sa capacité à atteindre des champs jusqu'à trois ordres de grandeur plus élevés que les techniques d'accélération conventionnelles, et devrait permettre de réduire drastiquement la taille et le coût des futurs accélérateurs à électrons. Des avancées importantes ont été accomplies dans la dernière décennie (comme par exemple l'accélération d'électrons jusqu'à 4,25 GeV dans un capillaire au LBNL à Berkeley), dans la production de rayonnement par différents mécanismes, comme les sources Betatron, Compton ou avec onduleurs électromagnétiques. Cependant, le pas à franchir pour construire des sources compactes réellement conformes aux besoins des utilisateurs reste important, et certaines performances des faisceaux produits doivent être améliorées, comme la dispersion en énergie, la stabilité, la charge des paquets accélérés.

CILEX-APOLLON

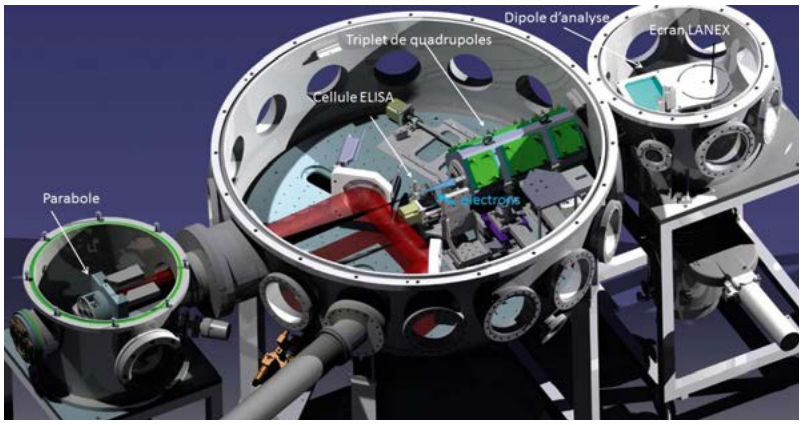
Les activités sont articulées autour du centre interdisciplinaire Cilex-Apollon qui rassemble et fédère les différents acteurs au niveau de l'Université Paris-Saclay (11 laboratoires) :

- Étude du dispositif expérimental de la salle « Longue Focale » de l'installation Cilex-Apollon à l'Orme des Merisiers dédiée à l'accélération laser-plasma de faisceaux d'électrons.
- Au sein du **Groupe Projet LFA**, le SACM a en charge les calculs de dynamique faisceau et la conception des lignes de transport ; il est notamment responsable du design de la ligne de transports du « schéma à deux étages » (injecteur et accélérateur).
- Ces activités devraient s'étendre prochainement vers des calculs de simulation dans les structures plasma, ainsi que vers le design et la réalisation de diagnostics faisceaux.
- R&D : étude et réalisation de la ligne de transport et d'analyse compacte de l'injecteur laser-plasma implanté sur la centrale de proximité UHI100 de l'Iramis/Lidyl.
- Dans le cadre du projet **DACTOMUS**, l'Irfu/Sacm a réalisé l'étude optique et fourni les éléments magnétiques : triplet formé de trois quadripôles à aimants permanents et spectromètre constitué d'un aimant dipolaire à aimant permanent.

PARTICIPATION AU RÉSEAU EUROPÉEN EURONNAC

Le réseau EuroNNAc (European Network for Novel Accelerators) rassemble les grands laboratoires et universités européens (plus de 50 Instituts) impliqués dans la R&D sur les nouvelles techniques d'accélération, dont l'accélération plasma représente la composante majeure. L'Irfu/SACM a rejoint ce réseau en mai 2014 qui a pour objectif de favoriser les échanges entre laboratoires et d'élaborer une réflexion à l'échelle européenne sur les nouvelles techniques d'accélération.

Vue du dessus de l'expérience Injecteur ELISA piloté par le laser UHI 100 implanté à l'Iramis/Lidyl (collaboration LPGP-Irfu-LIDyL-LLR-LAL). Crédit : CEA/LIDyL



Development of an injector and a magnetic transfer line in the framework of Cilex, A. Chancé et al, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/wepmy004.pdf

Cilex : EquipEx (contrat ANR 10-EQPX-25 EuPRAXIA : Horizon2020 Action of the European Commission (project number 653782)

Cilex : 11 laboratoires www.apollon-laser.fr
EuPRAXIA : 16 laboratoires et universités européennes www.eupraxia-project.eu

PARTICIPATION AU DESIGN STUDY EUROPÉEN EUPRAXIA

L'Irfu est fortement impliqué dans le Design Study européen EuPRAXIA du programme H2020. Ce projet (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications) produira une étude de conception pour un accélérateur de recherche plasma européen orienté vers les applications de nouvelle technologie. Un scénario de mise en œuvre sera proposé, incluant une étude comparative de sites possibles en Europe, une estimation du coût et un schéma de construction distribuée pour l'installation sur un site central. En tant que nouvelle grande infrastructure de recherche, EuPRAXIA placerait l'Europe au tout premier rang de développement d'accélérateurs plasma pilotés par les lasers les plus puissants du monde provenant de l'industrie européenne dans les années 2020.
Le Consortium EuPRAXIA comprend 16 laboratoires et universités de 5 états membres de l'Union européenne. En outre, 18 partenaires de 8 pays sont associés, impliquant les instituts à la pointe du domaine en Europe, Japon, Chine et États-Unis.
En plus de contribuer à la définition des paramètres globaux de l'accélérateur et au schéma d'implantation de l'installation, le SACM coordonne les simulations numériques réalisées avec des codes PIC (Particle-In-Cell) en vue d'optimiser les paramètres du plasma, du laser et les qualités du faisceau d'électrons.

LES ADS

PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS
Dynamic compensation of an RF cavity failure in a superconducting linac, Jean-Luc Biarrotte and Didier Uriot

H2020

Irfu/CNRS/SCK-CEN/ Cosylab/IAP

Les ADS (Accelerator Driven System) sont des réacteurs de 4e génération dans lesquels un cœur sous-critique est piloté par un accélérateur de protons à haute intensité suivi d'une source de neutrons. Ils présentent des caractéristiques inédites de sûreté et d'efficacité en particulier pour l'incinération par transmutation des déchets nucléaires à vie longue.
Le SACM est impliqué dans les différents programmes Européens dédiés au développement et à la R&D sur les accélérateurs de protons de haute intensité de type ADS répondant aux spécifications de Myrrha, projet démonstrateur belge au CEN-SCK. Ainsi depuis 2001 avec le programme FP5 jusqu'en 2015 avec le programme Myrte-H2020, le SACM contribue à la conception et à la définition de l'accélérateur linéaire. Le principal challenge est un taux de coupure exigé par le réacteur, exceptionnellement faible (< 0,1 par jour). Le service poursuit son implication à travers plusieurs axes de recherche incluant le développement de code, la dynamique des faisceaux et le développement de diagnostics spécifiques.

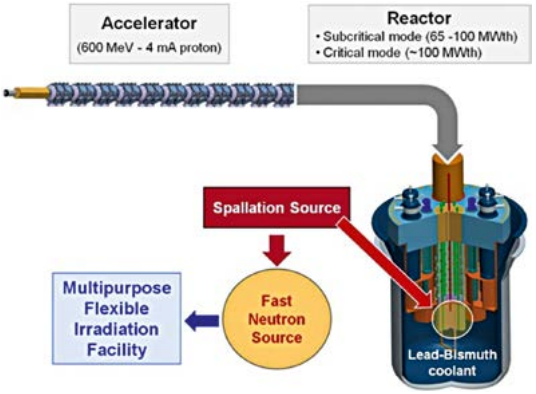
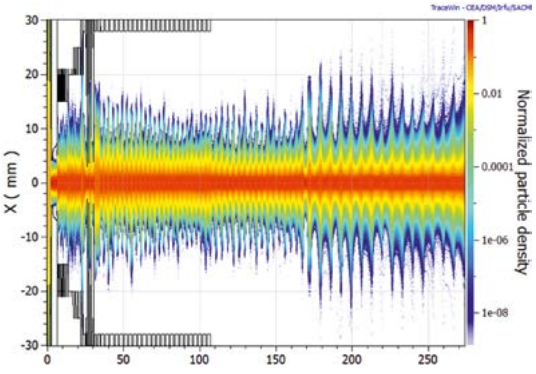


Schéma de principe de l'accélérateur de type ADS sur Myrrha à l'étude au CEN-SCK belge dans le cadre du programme européen H2020-Myrte.

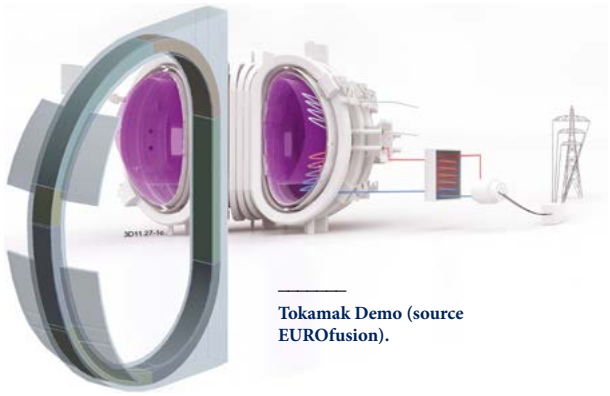
Simulation massive (109 particules) de l'accélérateur Myrrha réalisée au SACM avec les codes de simulation développés au SACM.



DEMO

Thermo-hydraulic analyses associated to CEA design proposal for Demo TF conductor. R. Vallcorba et al., CHATS on Applied superconductivity. Bologna, September 14-16 2015. Cryogenics, May 2016

EUROfusion



Tokamak Demo (source EUROfusion).

Demo est le successeur (à l'horizon 2040-2050) du réacteur expérimental de fusion Iter, et constitue la prochaine étape vers l'exploitation de l'énergie de fusion par confinement magnétique. Demo a pour objectif de développer et tester des technologies, des régimes de physique et des routines de contrôle d'exploitation d'un réacteur de fusion non plus comme une expérience scientifique, mais comme une centrale électrique, en phase pré-industrielle.

Afin de préparer le terrain pour l'étude conceptuelle de Demo, le SACM participe aux pré-études des aimants de ce tokamak, qui devrait permettre de produire au moins 2 gigawatts, dans un volume de plasma deux fois supérieur à celui d'Iter.

Sous le pilotage d'EUROfusion, et en collaboration avec le SIS, le CEA Cadarache ainsi que plusieurs instituts européens, le SACM participe en particulier à la modélisation en thermo-hydraulique du refroidissement des bobinages supraconducteurs dans les différents modèles envisagés.

R&D SUPRA HTc

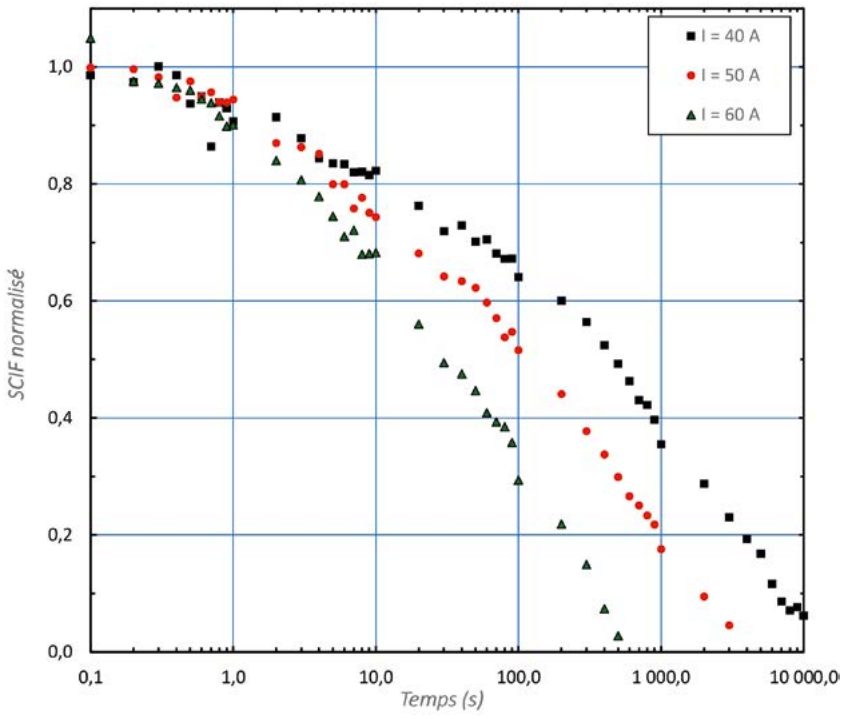
Les matériaux supraconducteurs à haute température critique, découverts il y a 30 ans, ont la particularité de conserver leurs propriétés jusqu'à des températures supérieures à celle de l'azote liquide (77 K). Cependant, la caractéristique utile pour nos activités reste leur capacité de transport de courant sous champ magnétique intense proche de la température de l'hélium liquide (4 K).
Cette capacité de transport de courant a connu des améliorations constantes au cours de la dernière décennie notamment pour les rubans ReBCO (Rare earth Barium Copper Oxyde). Le SACM est donc évidemment impliqué dans l'étude de ces matériaux dans le domaine des champs magnétiques intenses supérieurs à 30 T ou dans celui des accélérateurs pour des champs proches de 20 T.

CHAMPS MAGNÉTIQUES INTENSES

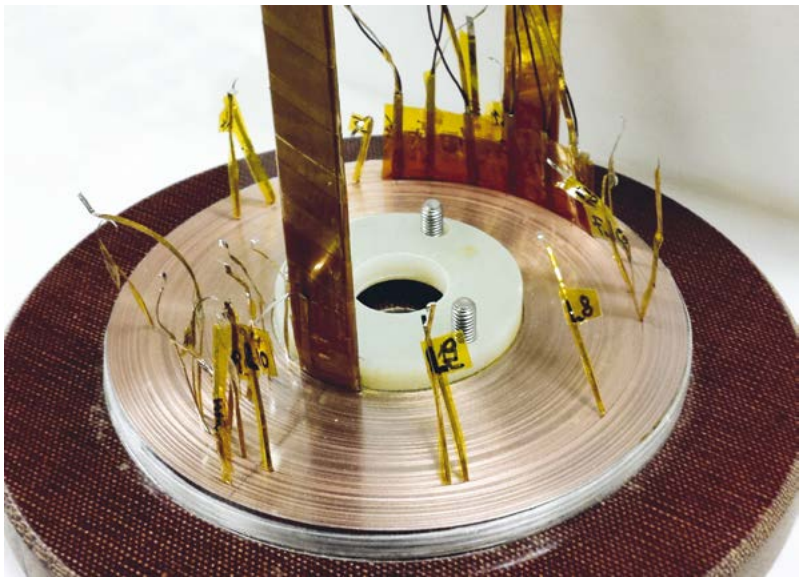
Les rubans supraconducteurs à haute température critique ReBCO offrent de nouvelles perspectives pour le design d'aimants à haut champ magnétique. Cependant, leur utilisation s'accompagne de problèmes comme celui de la protection ou des courants d'écrantage.

COURANTS D'ÉCRANTAGE

Du fait de la forme en ruban des supraconducteurs ReBCO, des courants parasites importants sont générés lors des variations de champ et conduisent à des perturbations sur le champ produit. Une thèse est actuellement en cours afin de mieux comprendre ce phénomène, de mesurer expérimentalement ses effets sur le champ central de bobines prototypes, et de le modéliser dans des outils de simulations numériques. Les courbes montrent la lente décroissance temporelle [la constante de temps de l'amortissement est de plusieurs heures (logarithmique en temps)] du champ magnétique généré par ces courants dans une galette de 60 tours. L'exploration de techniques visant à accélérer la décroissance des courants d'écrantages (de logarithmique à exponentielle) par « remuage de vortex » est également étudiée avec la réalisation d'une expérience financée par la R&D interne du SACM.

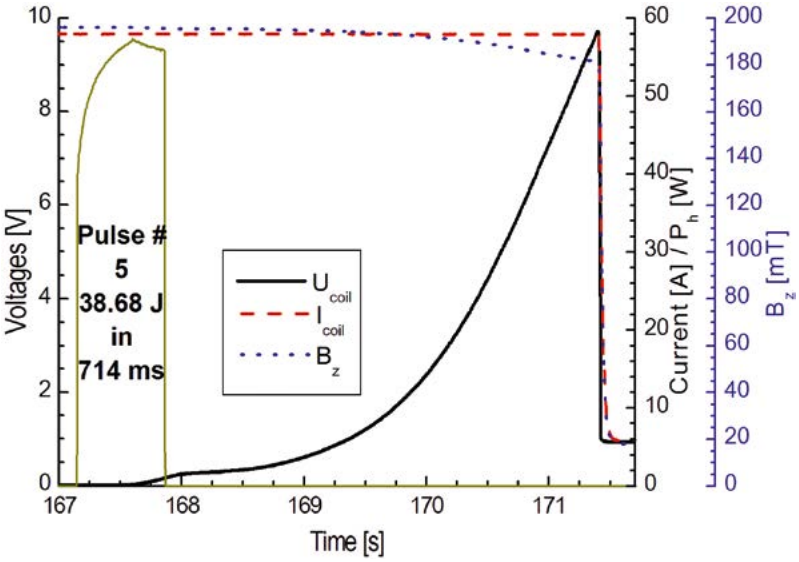


Mesure de la décroissance du champ magnétique généré par des courants d'écrantages (*Screening Current Induced Field*) dans une galette de rubans d'YBCo. La bobine est chargée à son courant nominal I ; les courants d'écrantages induits génèrent un champ magnétique dont on mesure l'évolution temporelle.



Galette MI instrumentée (amenées de courant, chaufferettes et prises de potentiel).

Comportement d'une galette à Isolation Métallique lors d'un *quench*.



PROTECTION PAR CO-BOBINAGE MÉTALLIQUE

La protection des aimants bobinés en matériaux SHTc est plus difficile que pour les aimants utilisant des matériaux à basse température critique à cause des faibles vitesses de propagation des zones normales et de la difficulté de détection (très faible niveau de tension).

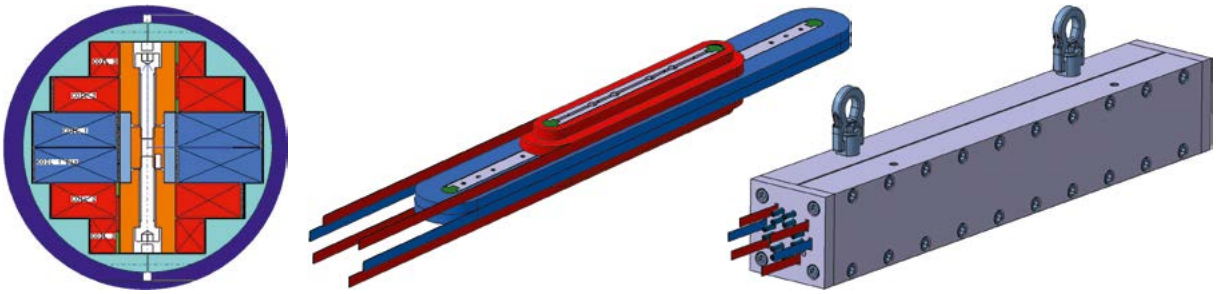
De nouvelles solutions de protection sont en train d'émerger et le SACM s'y est naturellement intéressé en étudiant la solution MI (Metal as Insulation) consistant à utiliser un ruban de métal électriquement résistif (inox) à la place de l'isolation classique (polyimide). Cette solution, qui n'a jamais été étudiée d'un point de vue de la protection, devrait permettre de conserver une très grande stabilité thermique comme dans le cas des bobines NI (No-Insulation) tout en réduisant considérablement le temps de chargement en courant (proche d'une bobine isolée classique). La technique NI consiste à bobiner le ruban sans isolation entre les spires. Les travaux en cours ont pour but de comprendre les phénomènes mis en jeu afin de pouvoir les prévoir.

La validation des modèles numériques étant indispensable, plusieurs échantillons (galettes de quelques centaines de spires) fortement instrumentés, cf. photo, sont étudiés à 77 K (LN2) et à 4,2 K (LHe). Un exemple de *quench* à 77 K est présenté sur courbes ci-contre. Le *quench* est initié par une chaufferette insérée dans le bobinage (pulse en rouge). La chute du champ magnétique (représentée en bleu) alors que le courant de la bobine (en rouge) reste constant met en évidence le phénomène de contournement de la partie transitée : le courant peut éviter la zone transitée et fortement résistive en se répartissant dans les tours voisins à travers l'isolation métallique.

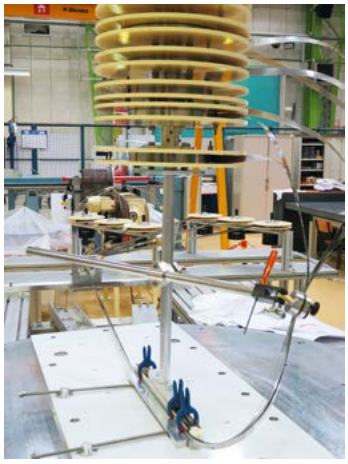
SUPRA HTc POUR LES AIMANTS D'ACCÉLÉRATEURS

Deux projets sont en cours au SACM pour l'application des supraconducteurs HTc aux aimants d'accélérateurs: l'insert HTc EuCARD et le dipôle HTc Eucard2.

L'**insert HTc EuCARD** est la première étape vers l'utilisation des supraconducteurs HTc pour les aimants d'accélérateurs. Il a comme objectif de démontrer la possibilité d'utiliser un ruban céramique de type ReBCO pour générer un champ de 5 T à 4,2 K dans le champ de 13 T du dipôle Fresca2.
L'aimant, conçu, réalisé et testé au laboratoire, sera un insert dipolaire constitué de 3 bobines plates type « racetrack » double couche, assemblées autour d'un pôle central en fer doux et maintenues par des mâchoires et une structure mécanique extérieure en acier inoxydable. Dans un premier temps la structure mécanique sera constituée de deux parties à section rectangulaire, fixées entre elles autour des mâchoires par un système démontable ; ceci facilitera les modifications lors des premiers tests de l'insert seul. Ensuite la structure mécanique démontable sera remplacée par un tube cylindrique en acier inoxydable Nitronic® 40 de 99 mm de diamètre extérieur pouvant être inséré dans le trou central du dipôle Fresca2. Les bobines étant plates, l'insert n'aura pas de trou libre central mais présentera une petite cavité au centre pour l'instrumentation de diagnostic (sondes de Hall pour la mesure du champ au centre).
Le conducteur de l'insert est constitué d'un ruban supraconducteur, approvisionné via le Cern auprès de la société SuperPower, et de deux rubans stabilisants isolés en CuBe2. Le ruban supraconducteur a été reçu en 2013, et le ruban stabilisant en décembre 2015 suite à un problème d'isolation sur les premières longueurs livrées. Des bobinages et un assemblage d'essai ont été effectués en 2015 pour valider toutes les procédures de réalisation. Les bobinages et l'assemblage de l'insert ainsi que son test en configuration aimant seul sont prévus en 2016.



Section et vue 3D CAO de l'Insert HTc Eucard, avec ses trois bobines double couche (à gauche et au centre) et la structure mécanique pour les tests en configuration aimant seul (à droite).



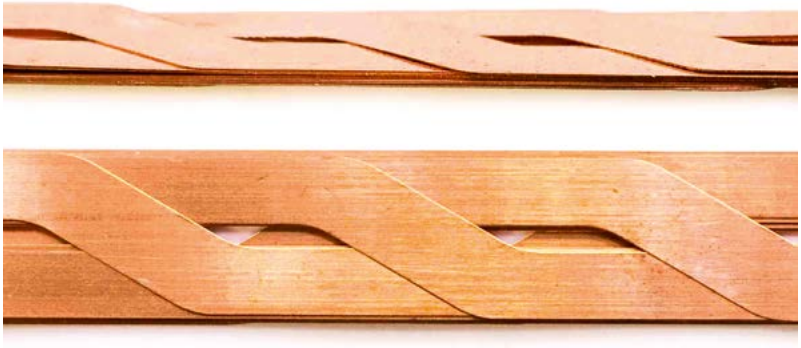
Bobinage d'essai de la couche inférieure d'une des bobines externes, avec le système de freins pour le maintien en tension des 6 rubans co-bobinés et les supports pour le guidage et maintien des rubans pour la couche supérieure.

Status of the EuCARD 5.4-T REBCO Dipole Magnet
F. Borgnolutti, M. Durante et al.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, N°. 4, June 2016

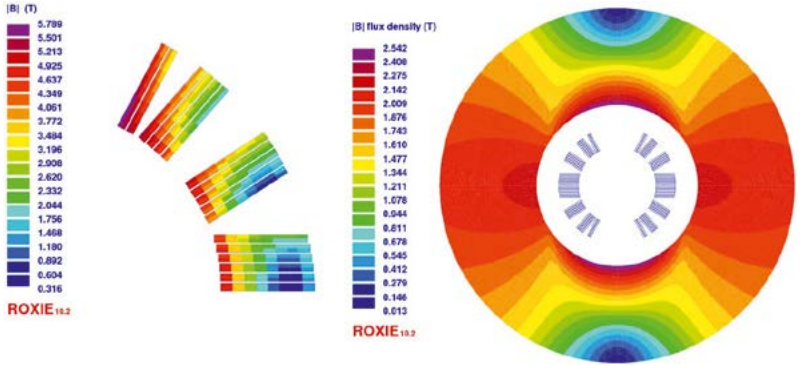
Development of a Roebel-Cable-Based cos θ Dipole: Design and Windability of Magnet Ends, C. Lorin, M. Durante et al.
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, N°. 3, April 2016

Accord de collaboration CEA/Cern No. KE2275/TE, Programme européen Eucard2

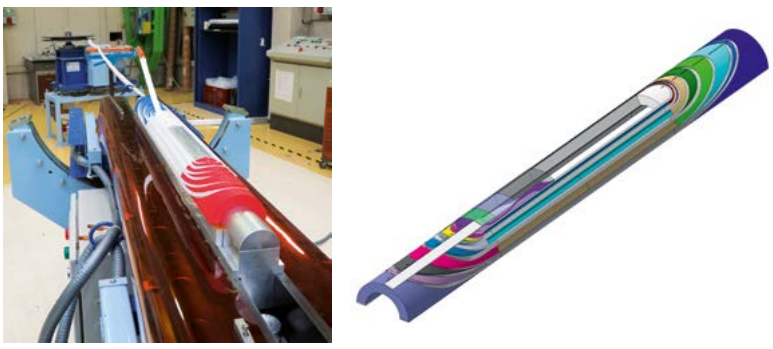
Le dipôle HTc Eucard2 est un projet d'étude et réalisation d'un dipôle 5 T en supraconducteur HTc avec des caractéristiques adaptées pour les accélérateurs. Ce dipôle peut pour cela être considéré comme la deuxième étape vers l'utilisation des rubans HTc pour les aimants d'accélérateur. Il sera testé en configuration aimant seul, complété par un circuit magnétique, puis en configuration insert dans le champ de fond de Fresca2. Le projet rentre dans le cadre du programme européen Eucard2 en collaboration avec onze instituts européens dont notamment le Cern, l'Institut Polytechnique de Grenoble, l'université de Tampere et l'institut technologique de Karlsruhe. Différentes configurations de bobinage ont été étudiées en parallèle par le Cern, le CEA et Grenoble INP Le travail du CEA est focalisé autour des configurations type cos-thêta. Le câble envisagé dans cet aimant est un câble de type Roebel, constitué de 13 à 15 rubans de type ReBCO découpés en forme de S et assemblés de façon à avoir un câble complètement transposé. Deux designs différents ont été proposés en fonction du câble Roebel utilisé. Les études détaillées des composants et outillages pour la réalisation des bobines ont démarré en 2015. Les bobines seront mises en forme puis imprégnées de résine sous vide afin de renforcer mécaniquement le câble Roebel et de limiter la dégradation des rubans dans le câble. Un bobinage d'essai a été réalisé en juillet 2015 et a permis de valider la conception des cales qui serviront à la mise en forme et au maintien du câble dans les têtes, ainsi que la configuration de sortie des câbles aux extrémités du bobinage. Les cales utilisées pour l'essai avaient été réalisées par impression 3D au CEA (Irfu/SIS). La réalisation des bobines supraconductrices est prévue en 2016. Elle sera précédée par des bobinages et un assemblage d'essai.



Câble Roebel réalisé à partir de rubans supraconducteurs en YBCO.

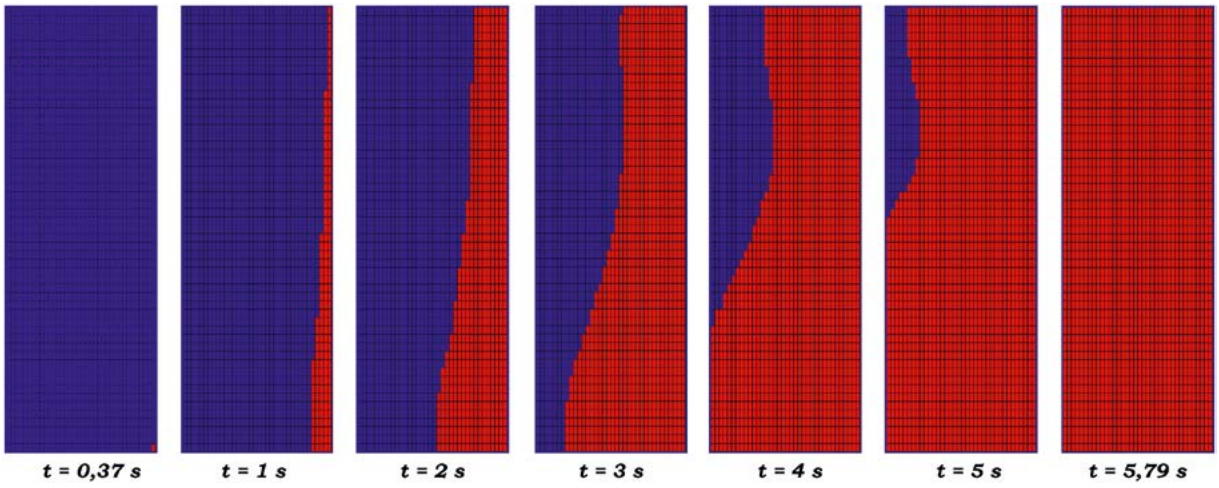


Carte du champ dans les bobines et dans le circuit magnétique du dipôle Eucard2 B réalisé au CEA .



Gauche : essai de bobinage en Juillet 2015.
Droite : vue 3D CAO d'une bobine du dipôle Eucard2 cos-thêta.

CALCULS DE PROTECTION



Projet Iseult-Neurospin. Propagation transverse de la zone normale dans le bobinage. Calcul par éléments finis CAST3M.

La protection est un point-clé dans l'étude et le dimensionnement des aimants supraconducteurs. En cas de transition irréversible de l'aimant de l'état supraconducteur à l'état normal, il faut décharger l'énergie magnétique qui y est stockée tout en respectant deux contraintes antagonistes : limiter la température maximale atteinte dans le bobinage et maintenir la tension par rapport à la masse électrique à une valeur raisonnable. Cela requiert entre autres une bonne maîtrise de la cinétique de la propagation de la zone normale dans le bobinage.

Les études analytiques n'étant pas envisageables dans la plupart des cas rencontrés, nous utilisons au sein du service plusieurs codes numériques répondant à cette problématique multidisciplinaire où thermique, électromagnétisme et parfois mécanique des fluides sont fortement couplés.
Ces codes sont écrits intégralement par nos soins (Fortran, Matlab, Qtransit), ou sont des codes publics ou du commerce dont les sources sont accessibles et que nous avons modifiés et adaptés à nos besoins (CAST3M) ou enfin un code commercial dont un module dédié permet cette étude (Roxie).

Le code Qtransit permet d'évaluer la protection d'un ou plusieurs aimants supraconducteurs avec l'étude du circuit électrique (*avec ou sans résistance de décharge*), la prise en compte de la propagation de la zone résistive en 3 dimensions et l'élévation de la température dans l'aimant ; on peut y ajouter des dispositifs de *quench-back*, passifs ou actifs (*chaufferettes*). Il est adapté à l'étude des aimants LTS (*NbTi ou Nb_3Sn*), les détecteurs du Cern, CMS et Atlas, ont été étudiés avec ce code.

Des procédures thermiques sous CAST3M permettent l'étude plus fine de la stabilité et de la propagation de la zone résistive ; ces calculs peuvent être réalisés en 3D (*étude de la Minimum Quench Energy (**MQE**) de câble supraconducteur*) ou en 2D (*propagation du quench dans la section d'un aimant*) suivant le nombre d'éléments du modèle. La stabilité et la protection de l'aimant Fresca2 ont été étudiées grâce à ces procédures. Elles peuvent aussi convenir pour l'étude des aimants HTS. Un code Fortran récemment mis au point permet l'étude des bobinages HTS NI (*No Insulation*) ou MI (*Metal as Insulation*) et de la propagation du quench avec prise en compte de la redistribution du courant entre tours via la résistance de contact.

Ces codes sont en constante amélioration/développement et permettent de couvrir un large spectre d'applications : aimants « secs » ou « mouillés », isolés « classiques » ou non isolés. Au sein du service, on compte une dizaine d'utilisateurs de ces codes dont la moitié d'experts-développeurs.

LOTUS

Design and Test of a Small "React-and-Wind" MgB_2 Double Pancake, R; Pasquet et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 25, issue 3, June 2015

FR n° 13 62981

Oséo-Bpifrance réf. L1207001W

CPMB, Sigmaphi, CEA

R&D SUR LE CONDUCTEUR MgB_2

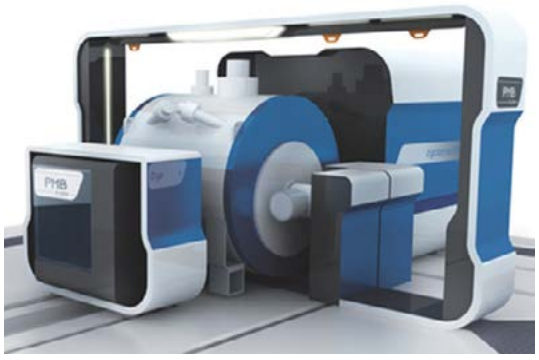
Lotus est un système de production de traceurs radioactifs à la demande, fournissant le produit directement dans une seringue injectable dans le patient avant une imagerie PET (Scintigraphie).

COMPOSITION DU SYSTÈME COMMERCIALISÉ PAR PMB

- Un cyclotron compact de 12 Mev réalisé avec un aimant supraconducteur à blindage actif.
- Un system automatique de changement de cible pour créer des ions radioactifs : C11 et F18.
- Une cassette microfluidique pour synthétiser le traceur comprenant les ions radioactifs.
- Un contrôle qualité en ligne.
- La mise en seringue automatique du traceur à injecter chez le patient est entièrement automatisée.

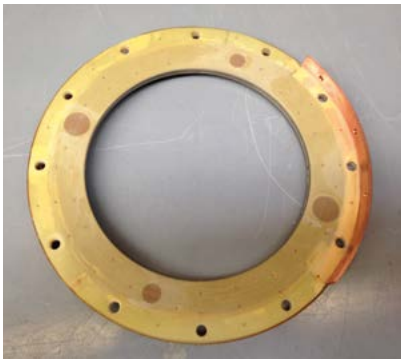
RÔLE DU SACM

Le cyclotron fonctionne dans un champ magnétique de 1,8 T généré par des bobinages supraconducteurs et entouré d'une culasse de 800 kg en fer. Le refroidissement se fait grâce à des cryogénérateurs qui refroidissent le bobinage par conduction solide jusqu'à une température de 4 K (-269 °C). Outre la conception de cet aimant sec, le SACM étudie, en collaboration avec Sigmaphi, la possibilité de remplacer le supraconducteur NbTi par du MgB_2 de façon à être plus robuste vis-à-vis des coupures intempestives du réseau électrique.



Vue d'artiste du cyclotron et sa ciblerie.

Le MgB_2 est le seul supraconducteur à haute température critique (Tc = 39 K) à être relativement bon marché ; mais il possède des caractéristiques supraconductrices limitées. Il est néanmoins appelé à remplacer le supraconducteur le plus utilisé (NbTi) car il permet aujourd'hui de fonctionner avec une cryogénie plus économique, sans hélium liquide.



Double galette en MgB_2 ($Ø_{ext.}$ = 300 mm).

L'utilisation du MgB_2 n'est pas simple, notamment car les déformations mécaniques dégradent ses propriétés supraconductrices. Aussi, une R&D sur le MgB_2 a-t-elle été lancée dans le service. En particulier, une thèse « Contribution au développement des aimants supraconducteurs MgB_2 R&W refroidis par conduction solide » a été effectuée de 2012 à 2014.

Dans le cadre de cette R&D, les trois principales étapes déjà franchies sont les suivantes :

- La réalisation d'une station de test permettant la caractérisation d'échantillons de conducteur MgB_2 et le test de petits bobinages (Ø < 300 mm).Les performances atteintes sont une température de 4 K, un champ de 3 T et un courant de 600 A.
- La caractérisation mécanique (module d'Young ; limite élastique ; dilatation différentiel…), électrique (courant critique sous champ, résistivité…) et thermique (capacité calorifique, conductivité thermique…) de nombreux échantillons commerciaux. Ces données sont nécessaires aux dimensionnements d'aimant supraconducteurs.
- La mise au point de techniques de bobinage (brevet CEA : FR n° 13 62981) et la réalisation de bobinage : une double galette (50 m de fil) et un solénoïde (2 km de fil).

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES TRANSFERTS DE CHALEUR EN HÉLIUM SUPERFLUIDE

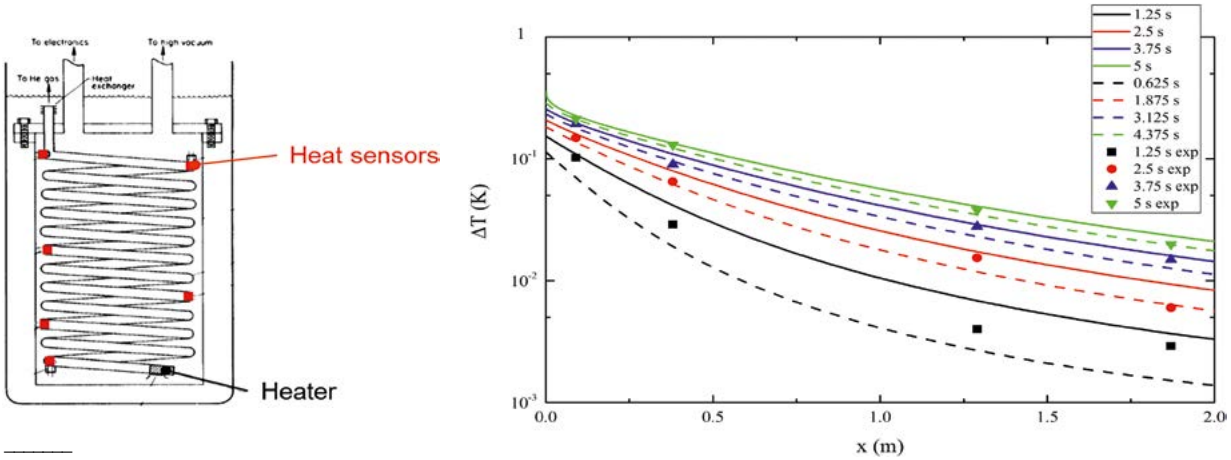
Implementation of the thermo-dynamic and phase transition equations of superfluid helium in CFD software, R. Bruce, S. Pascali, C. Vendramini and B Baudouy, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 101, pp 012166, 2015. https://doi.org/10.1088/1757-899X/101/1/012166

Contrat Cern "Thermal Studies"

Cern - CEA- IMFT

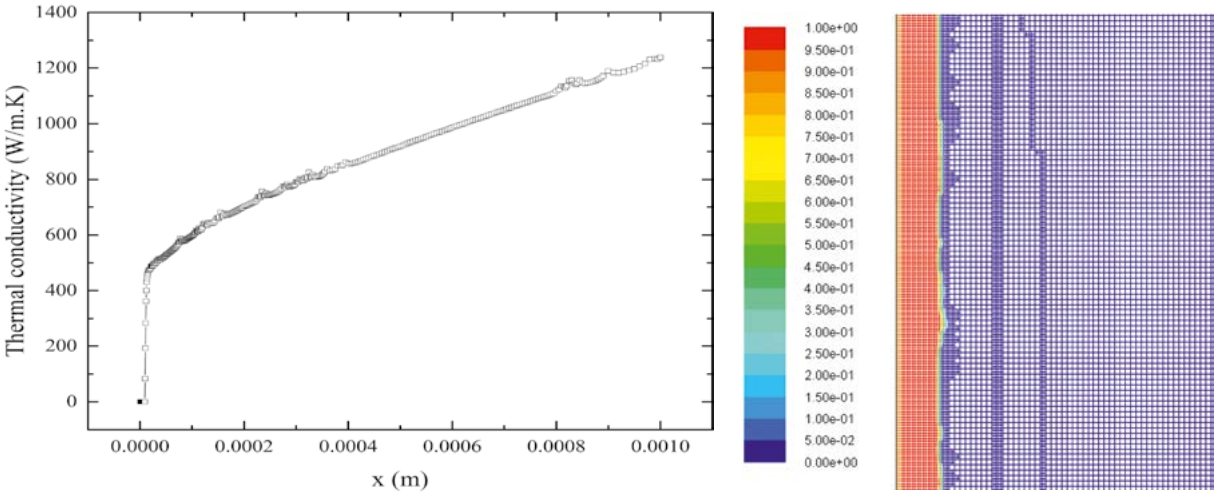
Dans une première partie, nous avons codé les équations du modèle à deux fluides simplifié de Gorter-Mellink de l'hélium superfluide sur le solveur numérique ANSYS Fluent. Les termes supplémentaires de ce modèle ont été rajoutés en langage C et compilés sous Fluent en utilisant l'interface UDF (User Define Function) du solveur en 2D et 3D. Les calculs réalisés avec ce code ont été comparé avec le code précédemment réalisé sous ANSYS CFX en régime permanent et à l'expérience de Van Sciver en régime transitoire. Les résultats obtenus suivent la même tendance que dans l'expérience. Dans une deuxième partie, nous avons réalisé un « nouveau » modèle pour reproduire la transition de l'hélium superfluide vers l'hélium normal liquide et gazeux en 2D. Ce modèle utilise la modélisation diphasique VOF (Volume of Fluid) de Fluent qui a été modifiée pour reproduire fidèlement l'avancée du front de transition superfluide/normal. Un maillage adaptatif dynamique a été rajouté proche de l'interface pour réduire les temps de calcul. Malgré cette optimisation, cette modélisation présente encore des temps de calcul trop importants (plusieurs jours pour un calcul 2D dans un petit canal). De plus, une expérience est actuellement en cours de réalisation dans le laboratoire pour valider les résultats obtenus par cette méthode. En complément, un autre code numérique a été réalisé pour modéliser le modèle à deux fluides complet de l'hélium superfluide sous le solveur FreeFem pour reproduire les transferts de chaleur dans les micros canaux et la transition entre les régimes de Landau et de Gorter-Mellink. Les calculs ont montré des résultats similaires aux expériences.

Cette nouvelle modélisation des transferts thermiques en HeII est innovante et n'avait jamais été réalisée sous cette forme auparavant. Elle doit pouvoir permettre de mieux prévoir et d'anticiper les comportements thermiques au sein des composants refroidis avec ce fluide (aimants supraconducteurs à 1,8 K par exemple).



Expérience de Van Sciver dans un canal d'hélium superfluide de 10 m de long (gauche) et la comparaison sur les températures avec le modèle numérique (droite).

Conductivité thermique (gauche) et front de transition de l'hélium normal en rouge (droite) lors du passage superfluide/normal sous Fluent.

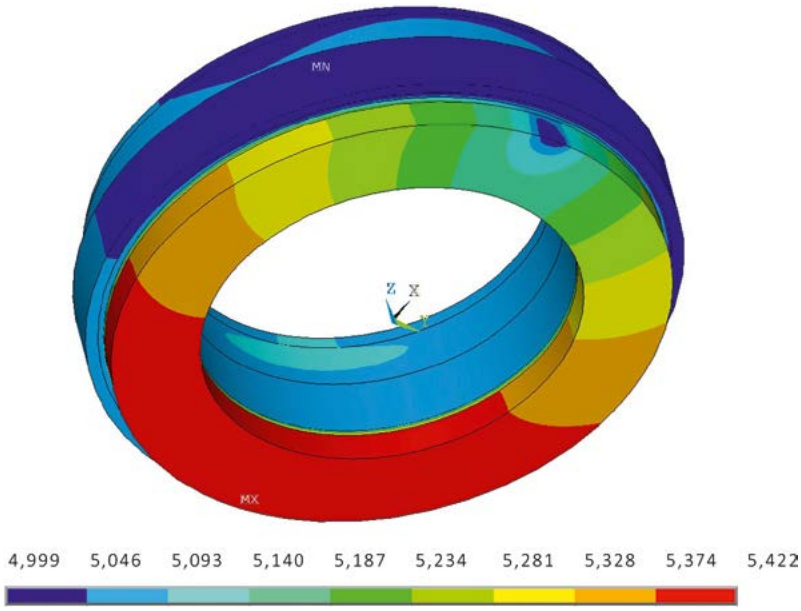


TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT INDIRECT

Le cryosat de la station d'essai Miri, B. Hervieu et al. 11e journée de Cryogénie et Supraconductivité d'Aussois, mai 2015

FR 2991809-A1

Nous avons étudié et réalisé un banc de test cryogénique pour l'imageur Miri qui a permis de valider notre technique de refroidissement par conduction, sans fluide. Dans la même dynamique, pour l'aimant Lotus, nous avons poursuivi notre approche vers le refroidissement sans hélium pour une masse 10 fois plus élevée (1 tonne) via 2 cryogénérateurs. Cette technique demande de développer des connexions thermiques de très bonne qualité pour homogénéiser la température de la masse froide qui comporte le plus souvent des matériaux de natures variées et aux propriétés très inhomogènes.



L'image ci-dessus donne la répartition des températures dans le mandrin Lotus. La zone visible au premier plan montre une coupe du mandrin en fer qui est localement refroidi au niveau de la tache bleue supérieure à 4,99 K. À l'opposé, en bas de l'aimant (en rouge) on observe la zone la plus chaude à 5,37 K. Cette partie du mandrin dispose du plus grand gradient de température car elle est isolée des bobines par des plaques de fibre de verre. Les bobines, elles-mêmes, sont refroidies par des drains indépendants qui leur permettent d'être globalement mieux refroidies que le mandrin.

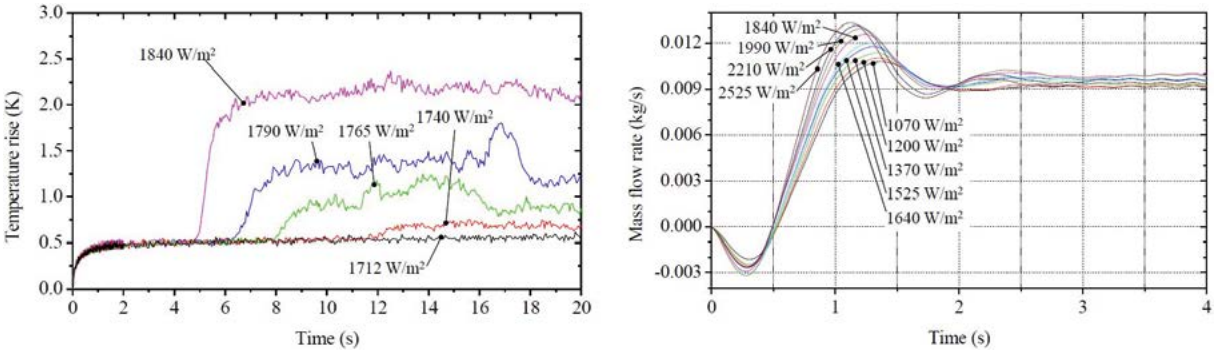
Le refroidissement sec, par conduction à partir d'un cryogénérateur, permet d'éviter les contraintes liées à l'utilisation classique des fluides cryogéniques (hélium et azote) comme réserves énergétiques ou comme caloporteurs. Si la mise en œuvre gagne beaucoup en simplicité ; la conception impose d'avoir une expérience et une bonne maîtrise pratique des résistances thermiques de contact. Celles-ci, en effet, sont très difficilement évaluables de manière fiable par calcul. Dans le meilleur des cas des résistances de contact trop élevées retardent la mise en froid mais au pire elles introduisent un écart de température qui ne permet pas d'atteindre la température requise. On peut par contre assez bien simuler leur influence sur le comportement thermique de la masse froide et déterminer les dimensions et emplacements optimums des contacts utiles pour obtenir la meilleure homogénéité en température (Refroidissement Lotus).

Pour le banc de test de Miri, la difficulté était de permettre de thermaliser le détecteur infrarouge dans une gamme de température qui s'étend de 4 K à 40 K avec une charge thermique variable. La solution a été obtenue grâce à la maîtrise des résistances de contact à 4 K pour lesquelles des valeurs très faibles ont été atteintes. Pour obtenir les gammes de température plus élevées, nous introduisons des réductions de section qui ajoutent une résistance thermique calibrée et donc un écart de température prédictible. Le contexte particulier de cette expérience nous a conduits à inventer un principe de support cryomécanique, également utilisé pour la bobine supraconductrice sur LNCMI, pour ramener la charge thermique dans la gamme de puissance utile d'un cryogénérateur.

Furci, H., Four, A., Baudouy, B. 2015. Experimental study of stability and transients in a horizontally heated boiling helium thermosyphon. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 101(1), 012062

TRANSFERTS DE CHALEUR TRANSITOIRES DANS UNE BOUCLE DIPHASIQUE DE CIRCULATION EN HÉLIUM

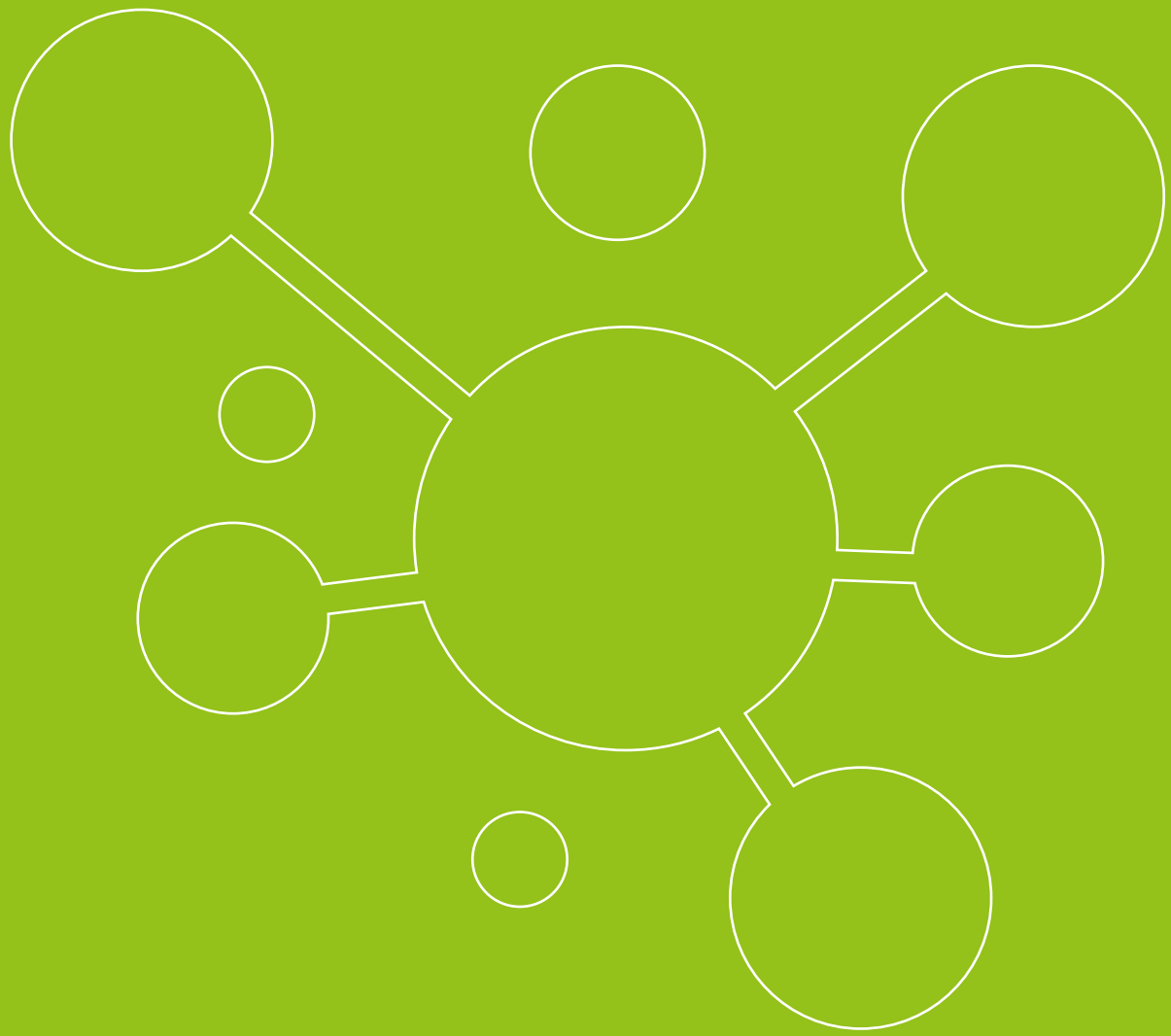
Nous avons mené des expériences sur une boucle de circulation naturelle diphasique de l'hélium, avec un état initial statique, soumis à des pulses de chaleur en paroi. Ce type de pulses de chaleur constitue une des sollicitations les plus violentes pour le système de refroidissement. Ces expériences nous ont permis d'étudier les différentes régimes thermo-hydrauliques de la boucle et de transfert de chaleur sur la paroi de la section chauffée et plus particulièrement la transition vers l'ébullition en film en transitoire (crise d'ébullition). Dans tous les cas, et jusqu'à 3 500 W/m², l'ébullition nucléée a été observée, que ce soit de manière stable en l'absence de crise ou pendant un laps de temps fini avant le début de la crise d'ébullition. La crise d'ébullition en régime transitoire a pu être observée pour les deux sections d'essai utilisées (diamètres de 6 et 10 mm). Dans certains cas, la crise d'ébullition est seulement temporaire, et dans d'autres cas elle reste stable. Les valeurs de flux critique (CHF) transitoires ont été déterminées. La crise d'ébullition temporaire a été observée pour des valeurs de flux de chaleur inférieures de 17 % (10 mm) et inférieures de 35 % (6 mm) à celles du régime permanent. La crise d'ébullition stable a été observée à une puissance allant jusqu'à 23 % de moins que le CHF pour la section de 6 mm de diamètre. La prématurité de la crise d'ébullition met en évidence que la crise d'ébullition doit être considérée différemment en régime transitoire et en régime permanent. Un temps critique a été systématiquement calculé à partir des données. Sa dépendance à l'égard du flux de chaleur a permis d'identifier différents mécanismes qui peuvent déclencher la crise d'ébullition. Nous pouvons distinguer principalement deux d'entre eux. Le premier est identique à celui qui provoque la crise en régime permanent, lorsque la puissance est augmentée lentement. Ce mécanisme repose sur des phénomènes stochastiques sur la surface chauffée et produit de longues périodes critiques. Il n'est pas du tout observé pour des flux de chaleur inférieurs au CHF. L'autre est un mécanisme directement relié à la boucle de circulation naturelle. Au cours de la phase initiale du transitoire, l'injection soudaine de puissance produit la dilatation du fluide à l'intérieur de la partie chauffée provoquant une expulsion du fluide par les deux extrémités de la section. Comme aucun liquide froid ne pénètre, l'évolution de la section chauffée est uniforme et des valeurs élevées de qualité ou fraction de vide peuvent être atteintes. Ceci empêche l'élimination de la vapeur en paroi et crée la crise en paroi. Le commencement de la crise d'ébullition ne peut pas être expliqué si nous ne prenons pas en compte l'étape du transitoire dans lequel le front froid pénètre et se déplace le long de la section chauffée. Expérimentalement nous avons pu vérifier qu'il est nécessaire qu'une valeur critique de fraction de vapeur locale soit atteinte avant que le front froid n'atteigne l'endroit de la crise.



Évolution en fonction du temps, et pour différents flux de chaleur dans le tube de 10 mm, de la température à la hauteur de 92 cm dans la boucle (à gauche) et du débit massique total (à droite). À flux croissant, la figure de gauche montre l'ébullition nucléée stable, la crise d'ébullition instable et pour les flux les plus grands l'ébullition en film stable.

les INFRASTRUCTURES le Synergium

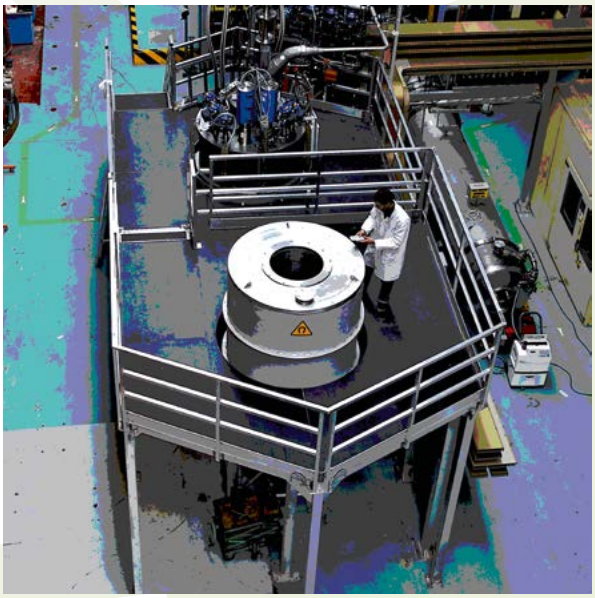
SACM **2013-2015**



les
INFRASTRUCTURES
le Synergium

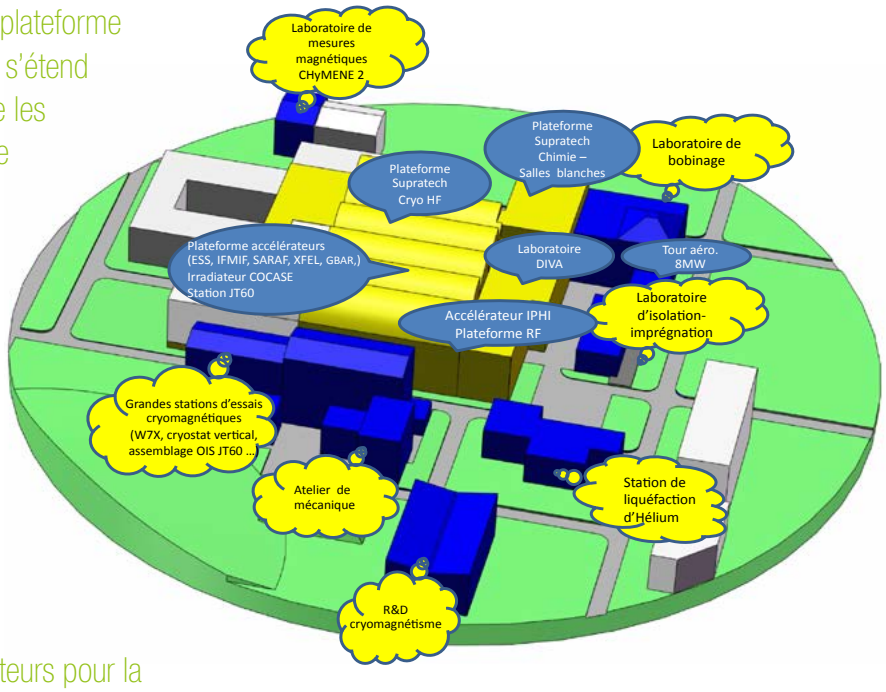
SACM **2013-2015**

plateformes technologiques et station d'essais



Le Synergium

Le Synergium est la grande plateforme technologique du SACM qui s'étend sur 25 000 m² répartis entre les installations 82 et 218. Cette plateforme est destinée à la communauté nationale, européenne et internationale, en vue de mener des recherches et des développements d'excellence dans le domaine des accélérateurs de particules, des systèmes cryogéniques et des aimants supraconducteurs pour la recherche fondamentale.



Le Synergium regroupe l'ensemble des moyens d'assemblage, d'essais et de caractérisations, thermiques, cryogéniques, mécaniques, électriques et hyperfréquences nécessaires à ses activités de pointe. Depuis de nombreuses années, cette plateforme joue un rôle majeur dans la construction des instruments de haute technologie pour la physique. Ses installations permettent aussi de valoriser nos connaissances dans les domaines connexes tels que l'énergie (étude de matériaux pour la fusion thermonucléaire via le projet Ifmif et la 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).

La station d'essais Seht

Fabriquée pour générer un champ magnétique de 8 T dans un grand volume, la station Seht utilise un bobinage solénoïdal avec un conducteur en NbTi assemblé en doubles galettes refroidies par un bain d'hélium superfluide à 1,8 K et 1,2 bar absolu. Ce solénoïde reconditionné pour Seht est l'ancienne bobine supraconductrice de l'aimant hybride (35 T) du LNCMI de Grenoble. La station implantée au bâtiment 198 a déjà été utilisée pour le projet Iseult pour valider expérimentalement les concepts technologiques retenus (cryogénie 1,8 K, circuit électrique, contrôle commande, validation du conducteur, la protection et la tenue mécanique sous champ du futur aimant, principe de stabilisation et d'écrantage magnétique).
Le trou de champ (8 T) offre une zone de test de grand diamètre (diamètre utile 587 mm à 300 K) pouvant recevoir, selon un axe magnétique vertical, des échantillons ou composants à température ambiante ou en cryostat dédié.
Après les essais R1 menés jusqu'en début 2013 pour le projet Iseult (vérification de la cohérence du conducteur supraconducteur sous contrainte dans sa configuration bobiné), l'alimentation cryogénique de cette station (liquéfacteur Cello) a été redéployée vers la zone JT-60SA au bâtiment 126 interrompant l'utilisation de cette station. Toutefois, compte tenu de l'intégrité de cette station (contrôle, alimentation électrique, protection, pompage 1,8 K, LN2) et de la polyvalence de son alimentation en He (SHe 6 K ou LHe 4,2 K) au travers de son satellite cryogénique dédié, la remise en fonction de cette station est envisagée en utilisant soit le liquéfacteur 4003 situé dans la zone ouest du bâtiment 198 (court terme) soit le liquéfacteur Cello (long terme) installé au bâtiment 126. Dans les 2 cas, le transfert d'hélium liquide (LHe) pourrait être assuré par l'installation d'une ligne cryogénique coaxiale LHe/GHe Nexans (ex : Kabelmetal) limitant les pertes thermiques sur ces longs trajets de plusieurs dizaines de mètres. Dans ce mode d'alimentation de Seht par LHe, la consommation cryogénique en opération 8 T est d'environ 60 l/h (hors mise en froid) compatible avec les capacités des 2 sources d'hélium liquide proches, respectivement 120 l/h et 70 l/h pour Cello et 4003.
Les moyens électriques (alimentations fort courant), cryogéniques (LN2, sources LHe, réseaux He), de diagnostic (acquisition rapide multi-voies) et de manutention (ponts roulants de 10 à 50 t) à disposition dans l'aire Schema (bâtiment 198 est), où est implantée la station Seht, permettent aujourd'hui d'envisager des tests de composants sous champ magnétique jusqu'à 8 T. En particulier, dans le cadre des programmes de R&D sur les supraconducteurs adaptés aux futurs projets cryomagnétiques, ces stations devraient permettre l'évaluation des performances, sous fort champ, des supraconducteurs à haute température critique en configuration conducteur simple ou bobinée ou bien encore les tests de masse froide d'aimants Nb_3Sn dans les nouveaux aimants d'accélérateurs à hautes performances.

La plateforme JT-60SA

Dans le cadre de la contribution de l'Europe à la réalisation du Tokamak Japonais JT-60SA, l'Irfu/SACM est en charge de la conception, la réalisation et l'exploitation d'une station d'essais cryogénique pouvant tester chacun des 18 aimants toroïdaux du Tokamak dans ses conditions nominales de fonctionnement. L'objectif principal de ces essais est de démontrer le bon fonctionnement de chaque aimant à 25,7 kA et 5 K mais également de déterminer la marge en température du Tokamak en mesurant la température de quench de chaque bobine.

En 2013, la phase de design de la station étant complètement terminée, les principaux marchés du projet ont pu être lancés. Les plus importants d'entre eux concernaient :

- Le circuit cryogénique : la fourniture du circulateur froid, des vannes cryogéniques et du réservoir d'hélium liquide.
- Le circuit électrique : la mise à niveau de l'alimentation électrique à 25,7 kA ainsi que la conception et la réalisation d'une paire d'amenées de courant en matériau supraconducteur à haute température critique (HTS).
- Le contrôle commande : la fourniture des automates et de tous les capteurs de pression, température et débit.
- La protection : la conception et la réalisation des cartes composant le système de protection de l'aimant en cas de quench (Magnet Safety System).

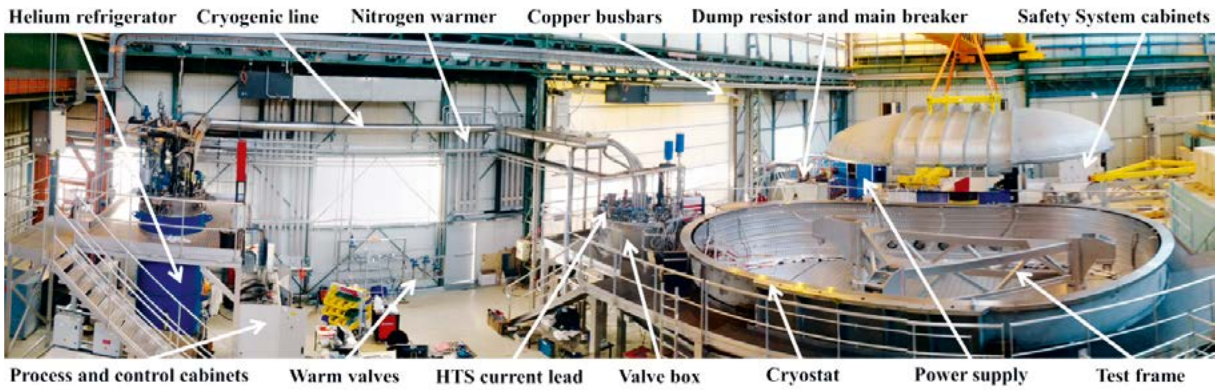
Suite au lancement de tous ces marchés, l'activité majeure du projet s'est partagée en 2014 entre suivi de fabrication, intégration et réalisation de la station d'essais dans le hall 126. Les chantiers les plus importants furent :

- L'installation des équipements cryogéniques tels que les vannes, le circulateur, le tank hélium et le raccordement de tous leurs circuits hydrauliques à l'intérieur de la boîte à vannes.
- Le déplacement de l'alimentation électrique 25,7 kA et son raccordement aux amenées de courant via 20 mètres de câbles souples refroidis à l'eau et suspendus à 8 mètres de hauteur.
- Le câblage de toute l'installation comprenant le réseau, l'instrumentation et l'automatisme.
- L'intégration et le test de toutes les cartes constituant le système de protection de l'aimant.

Une fois la réalisation de la station terminée fin 2014, l'année 2015 a été consacrée aux tests et à la validation de la station dans sa globalité. La première étape fut de vérifier une grande partie des équipements de manière individuelle comme par exemple le test de tous les automates et des entrées et sorties de tous les signaux analogiques ou digitaux. Par la suite, deux essais majeurs de validation ont été réalisés :

- Le test au courant nominal à 25,7 kA d'un court-circuit supraconducteur reliant les deux amenées de courant de la station. Ce premier essai a permis de valider l'ensemble du circuit électrique de l'installation et le fonctionnement pour la première fois des amenées de courant supraconductrices aux valeurs nominales de courant et de température.
- La mise en froid et le test à 5 kA d'un aimant prototype du stellarator W7X avec une bobine pesant environ 5 tonnes. Cet essai a permis de valider dans un premier temps les performances et le processus de réfrigération de la station. Une fois la température de 5 K atteinte, le test à 5 kA, il a également validé le système de protection des aimants dans sa globalité par l'initiation et détection d'un « quench » dans la bobine.

Au dernier trimestre de l'année 2015, la station d'essais JT-60SA était complètement validée et prête à temps pour accueillir la première bobine toroïdale du Tokamak qui est arrivée en décembre 2015 et qui a été testée avec succès dans les semaines suivant son arrivée.



Stations d'essais cryogéniques

MECTIC

Station de mesure à température variable refroidie par cryogénérateur permettant des mesures de conductivité thermique par méthode différentielle ou intégrale sur des échantillons d'une trentaine de centimètres dans une gamme en températures de 4,2 K à 300 K.

KAPITZA

Cellule de mesure de la résistance de Kapitza et de conductivité thermique en hélium superfluide entre 1,7 K et 2,1 K sur des échantillons de faible épaisseur (0,5 mm), jusqu'à 80 mm de diamètre.

THERMOSIPHON

Boucle de circulation ouverte avec réservoir permettant la 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 de 0 à 22 g/s en liquide et de 8 g/s en gazeux pour une puissance dissipée de 160 W. Ces mêmes caractéristiques en azote sont de 0 à 40 g/s pour une puissance maximale dissipée de 8 kW.

THERMAUTONOME

Boucle de circulation avec recondensation par cryogénérateur pour la caractérisation d'écoulements monophasiques et diphasiques par des mesures de pertes de pression et de température en paroi le long d'une section de test verticale (de 30 cm). Cryogénérateur : 1,5 W à 4,2 K. Pression : de quelques mbars à 3 bars. Température : de 3 K à 30 K. Puissance dissipable dans la boucle : 4 W à 10 K.

DOUBLE BAIN

Cryostat sur le principe du « double bain HeI/HeII » permettant de réaliser des études thermiques en hélium superfluide pressurisé statique jusqu'à une puissance de 10 W. Dimensions du réservoir 1,8 K : diamètre 200 mm x hauteur 200 mm avec pression maximale de 1,5 bars(a).

CRYOPULSE

Cryostat horizontal de 6 m de long permettant la caractérisation d'écoulements et de performances thermiques par des mesures de température et de pression dans des caloducs oscillants cryogéniques allant jusqu'à des longueurs de 4 m. Puissance disponible pour la boucle : 200 W.

Liquéfacteurs

RÉFRIGÉRATEUR CELLO POUR LA STATION D'ESSAIS JT-60SA

La station d'essais JT-60SA a été étudiée et construite afin de valider les 18 aimants supraconducteurs qui seront assemblés sur le tokamak JT-60SA à Naka au Japon.
Le liquéfacteur/réfrigérateur de type Hélial « Cello », initialement attaché à la station d'essais des aimants prototypes pour le LHC a été déplacé et assure maintenant le refroidissement de la station d'essais puis produit l'hélium liquide nécessaire à la réalisation des tests en courant des aimants.
La puissance de réfrigération est d'environ 500 W à 4,2 K et sa production en simple mode liquéfacteur est d'environ 120 litres/h.

LIQUÉFACTEUR HÉLIAL 4008 POUR LA STATION DE LIQUÉFACTION

En 2015, ce sont 131 000 litres d'hélium liquide qui ont été livrés à différents laboratoires situés sur le site du CEA Saclay ou dans ses environs.
Le liquéfacteur de type Hélial « 4008 », d'une capacité d'environ 70 l/h, assure la production de l'hélium liquide dans 2 réservoirs de 6 000 et 18 000 litres qui contribuent à la grande souplesse de la gestion de la station de liquéfaction. Un réseau de récupération, recompression, stockage et de purification permet de recycler environ 50 % du gaz hélium distribué (taux de récupération incluant les utilisateurs à gaz perdu).

LIQUÉFACTEUR/ RÉFRIGÉRATEUR HÉLIAL 4003 POUR LA STATION D'ESSAIS W7-X

La station d'essais W7-X a permis de valider les 70 aimants supraconducteurs qui ont été assemblés sur la machine de recherche du programme européen de fusion thermonucléaire par confinement magnétique, le stellarator Wendelstein 7-x.

Cette station d'essais est composée de 2 cryostats d'un diamètre utile de 5 m et d'une hauteur utile de 4,1 m. Le liquéfacteur de type Hélial « 4003 », d'une puissance d'environ 200 W à 4,2 K, assure son refroidissement. Entre 2010 et 2015, cet ensemble a été utilisé principalement par les projets R^3B-Glad et Iseult pour le test de grands composants aux températures de l'hélium liquide.

Salles Blanches

Le SACM dispose de deux salles blanches pour répondre aux activités de R&D sur les cavités et de production pour les cryomodules :

SALLE BLANCHE DE 170 m²

Compartimentée en 3 classes ISO : 7, 5 et 4 pour l'assemblage des cavités après un rinçage à haute pression.
- Salle blanche de classe ISO 4 de 112 m².
- Sas de lavage Belined pour le nettoyage extérieur des cavités avant leur entrée en salle blanche ISO 4.
- Boucle d'eau ultrapure et ultrafiltrée.

SALLE BLANCHE DE 90 m²

Compartimentée en 2 classes ISO : 7 et 5 pour l'assemblage des cavités après un rinçage à haute pression.
- Salle blanche de classe ISO 7 pour la préparation des pièces (nettoyage extérieur des cavités avant leur entrée en salle blanche)
- Salle blanche de classe ISO 5 de 52 m²
- Boucle d'eau ultrapure et ultrafiltrée.
- Rinçage haute pression à l'eau pure ultrafiltrée.

Avec les installations complémentaires associées :
- 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 levage permettant la manipulation de charges jusqu'à 20 t.
- Machine Belined de dimension utiles : H 1,5 m x L 1 m x P 2 m, cette machine permet le lavage externe des cavités ou composants devant pénétrer dans la salle blanche ISO 4 et assure les cycles de nettoyage, rinçage et séchage.

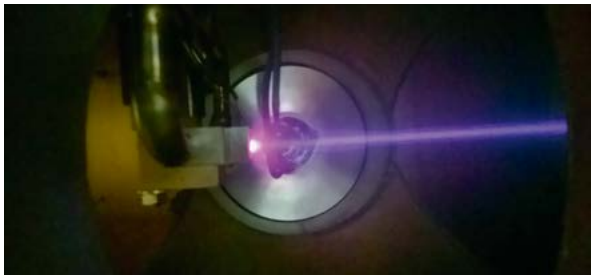
Plateforme RF 352 MHz

La plateforme RF 352 MHz est équipée :
- De deux klystrons Thales TH2089B pouvant délivrer chacun 1,3 MW de puissance RF en mode continu.
- D'un klystron pulsé Thales TH2179A avec un modulateur DTI intégré par Sigmaphi, de puissance crête 3 MW pouvant délivrer 240 kW de puissance RF moyenne, avec des durées de pulses comprises entre 10 et 3 600 µs et un taux de répétition compris entre 1 et 50 Hz. Ces caractéristiques couvrent en particulier le cycle utile de la source européenne de spallation ESS.

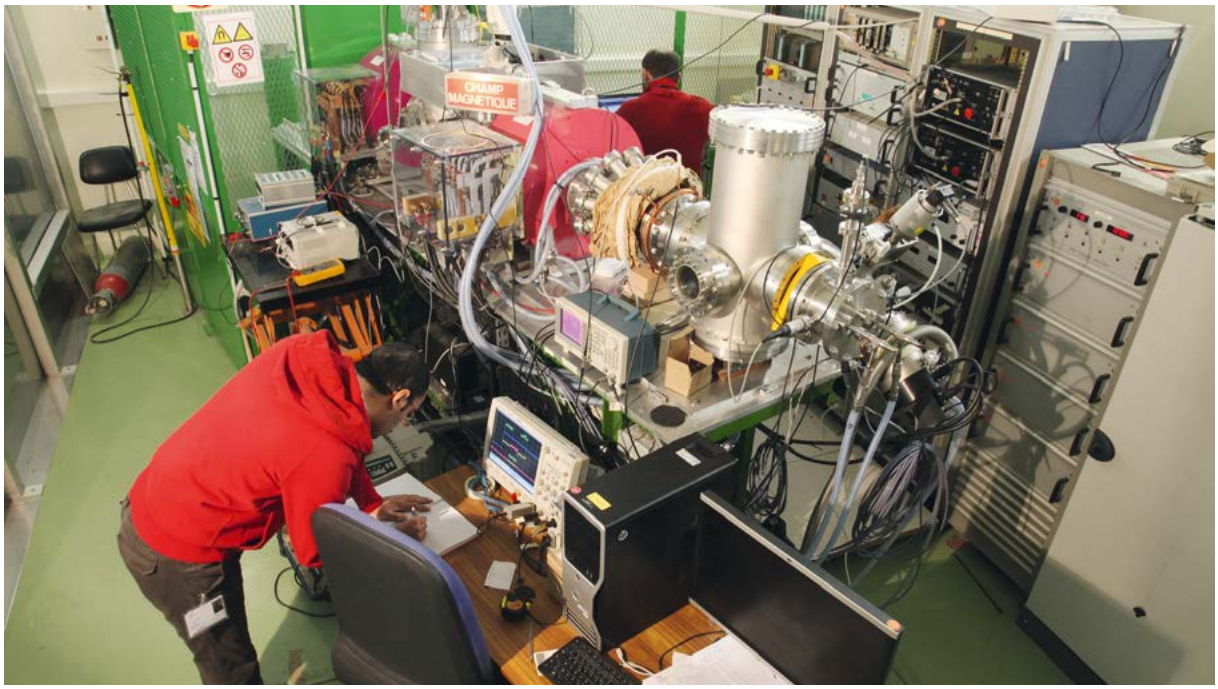
Ces sources de puissance RF peuvent alimenter soit l'Injecteur de Protons à Haute Intensité (Iphi), soit un ensemble de deux casemates radio-protégées pour des tests en puissance ou du conditionnement RF de structures accélératrices (RFQ, coupleurs de puissance, cavités résonantes).

Plateforme Betsi

Pour permettre les développements des sources d'ions et des équipements annexes comme les diagnostics, le SACM s'est doté d'une plateforme de tests appelée Betsi (Banc d'Études et de Tests des Sources d'Ions). Initialement prévu pour travailler avec des faisceaux de quelques kW (50 kV max et 50 mA) en mode pulsé, le banc Betsi est aujourd'hui en cours de modification (grâce à un financement Sesame) pour permettre la production de faisceaux de 10 kW (100 kV et 100 mA) en mode pulsé et/ou continu.
Betsi est également une plateforme d'essai ouverte à des expériences et utilisateurs extérieurs. En effet, hormis les développements internes sur la source Alisés, jusqu'à aujourd'hui Betsi a permis de tester :
- Les mesureurs de profile par ionisation (IPM) du projet Ifmif-Lipac.
- Le chopper du projet ESS construit par l'INFN Catania ;
- Le comportement des doigts du projet S3 avec des dépôts de puissance supérieurs à 1 kW/cm^2.
- L'irradiation de plusieurs types de scintillateur pour un émittancemètre innovant (cf. Emit 4D).
- L'émittancemètre de type Allison scanner développé pour l'injecteur Fair.
- Le fonctionnement des 2 premières sources Silhi 2 vendues par la société Pantechnik.



Irradiation de l'un des doigts pour le projet S3.



Test du Chopper ESS conçu par l'INFN Catania (Italie) sur le banc Betsi.

Supratech Cryo/HF

Plateforme Supratech.

La station Supratech Cryo/HF est pourvue d'équipements cryogéniques et hyperfréquences qui permettent de développer les sous-ensembles clés des accélérateurs supraconducteurs comme les cavités supraconductrices, les coupleurs de puissance ou des modules complets d'accélérateurs type cryomodule.
Au cours des trois dernières années, elle a permis de tester principalement les 12 cavités et les 12 cryomodules Spiral2, les coupleurs de puissance de Hippi (dans le cadre du programme européen Eucard et en collaboration avec le Cern) et les cavités prototypes des projets Ifmif et ESS.
La station participe aussi aux activités de R&D sur les développements de nouveaux procédés de préparation des cavités supraconductrices afin d'améliorer leurs performances (Champ accélérateur maximal et pertes RF minimales).

La station d'essais est constituée :

- D'une unité de production d'hélium liquide composée d'un compresseur à vis de 80 g/s (Mycom) couplé à une capacité tampon de 100 m^3, d'une boîte froide appelée plus communément liquéfacteur équipé de 2 turbodétendeurs, d'un pré refroidisseur à l'azote liquide et d'un épurateur interne fabriqué par Air Liquide. Ce liquéfacteur de type Hélial est capable de produire environ 140 l/h. À ces éléments de procédés sont associés une sous-station électrique, trois bidons de stockages d'un volume de 2000 l chacun et trois groupes de pompages affectés à chaque cryostat pour pomper sur le bain hélium et atteindre les températures de l'hélium superfluide aux conditions de saturation.

Unité de production d'hélium liquide.

◆ D'un Cryostat horizontal de laboratoire (CryHoLab), équipé de ses accessoires, coupleur de puissance et système d'accord, il permet de tester des cavités supraconductrices dans des conditions identiques à celles d'un accélérateur, c'est-à-dire une cavité en position horizontale.

Cryostat horizontal CryHoLab.

◆ De deux grands cryostats verticaux qui servent aux premiers tests des cavités pour la mesure du champ accélérateur et du coefficient de surtension des cavités supraconductrices.
CV1 : Diamètre utile : 0,45 m, hauteur : 1,7 m,
Hauteur hélium : 1 m à 4,2 K et 0,6 m à 1,7 K,
Consommation : 450 l d'He par test.
CV2 : Diamètre utile : 0,7 m, hauteur : 2,92 m,
Hauteur hélium : 1,9 m à 4,2 K et 1,2 m à 1,7 K,
Consommation : 1 500 l d'hélium par test.

◆ De deux petits cryostats verticaux C1 et C2 qui servent à mesurer les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux supraconducteurs.

Cryostat vertical (CV1) et cavité mono cellule installée sur son insert de test.

◆ D'une plateforme RF de puissance constituée :
- 1 source de 704 MHz avec un fonctionnement pulsé de 1 MW crête avec des impulsions de 4 ms à la fréquence de 16 Hz (permettant d'atteindre les spécifications du projet ESS).
- 1 source de 704 MHz-80 kW en continu.
- 1 source de 1 300 MHz avec un fonctionnement pulsé de 2 MW crête, impulsion de 1 ms à la fréquence de 10 Hz (20 kW moyen).

Plateforme RF.

◆ D'un casemate de test pouvant accueillir les grands cryomodules de type ESS, Saraf, Ifmif et ILC et connecté à la fois à l'unité de production d'hélium liquide pour leur refroidissement cryogénique et à la plateforme RF pour leur alimentation en puissance RF.

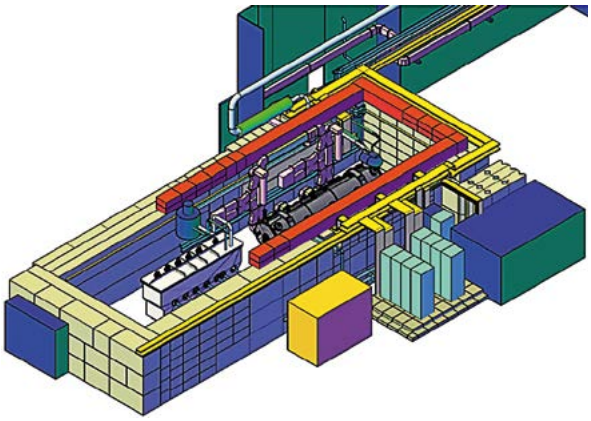


Image du casemate de test pour cryomodules.

les
INFRASTRUCTURES
le Synergium

SACM **2013-2015**

laboratoires & ateliers

Laboratoire de chimie

Le laboratoire de chimie dispose de :

- 6 sorbonnes ventillées pour le traitement des échantillons et des cavités, dont une installation d'électrpolissage vertical qui permet le traitement soit chimique, soit électrochimique de la surface interne des cavités de niobuim au moyen d'acides concentrés.
- Local de stockage attenant (acides, solvants).
- Installation de production d'eau pure et ultra-pure.
- Installation de traitement des effluents liquides acides dilués.
- Cuve stockage des rejets acides concentrés (capacité 5 m^3).
- Extraction et neutralisation des vapeurs acides par tour de lavage de gaz.
- Cuve de dégraissage ultra-sons (capacité 350 l).

Laboratoire isolation-imprégnation

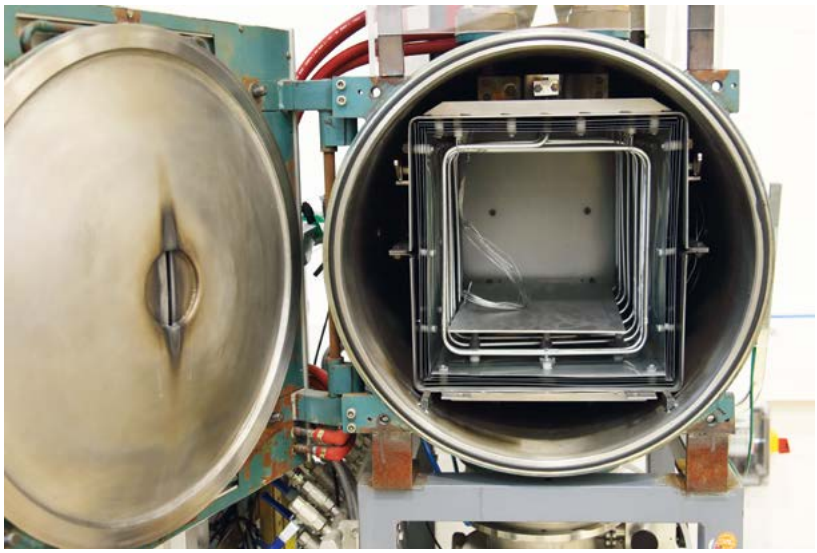
Le laboratoire d'isolation – imprégnation apporte un support technique aux projets du SACM pour l'isolation des aimants supraconducteurs et leur bobinage: réalisation de bobines de faibles dimensions, imprégnation de prototypes ou d'éprouvettes de caractérisation, préparation des câbles supraconducteurs avant caractérisation via la dissolution de l'aluminium ou du cuivre, mise en œuvre de résines et de produits chimiques, caractérisations à température ambiante (calorimètre, tensiomètre, rhéomètre, pycnomètre)…

Laboratoire Diagnostique Vide - Assemblage (Diva)

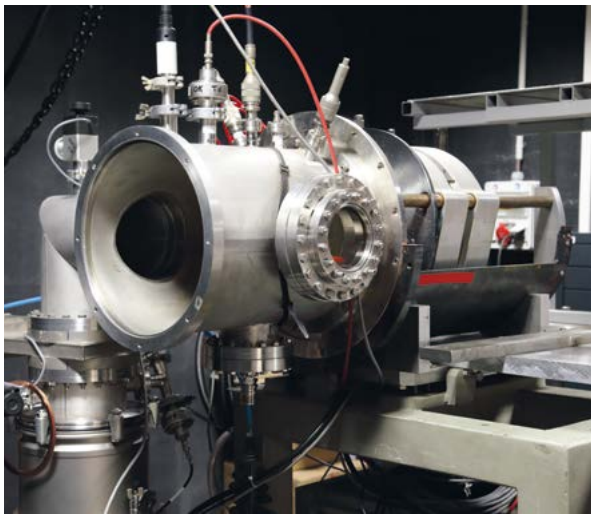
Le laboratoire prend en charge la mesure du vide, la recherche sur la désorption des matériaux ainsi que les développements des techniques d'ultravide (montages et tests). Il est notamment équipé :

- D'un four à ultravide 1 200 °C à 10^{-6} Pa avec une homogénéité à 900 °C de ± 3 °C.
- D'un banc de mesures de désorption permettant la qualification des matériaux ainsi que de mettre au point les procédures de nettoyage nécessaires à l'ultravide.
- De chambres à vide (~ 10^{-5} Pa) pour des tests de composants spécifiques.

Courant 2015, le four à ultravide a été remis en service après une mise à jour du système d'écrantage en molybdène, de la thermométrie, du contrôle commande ainsi que du système de refroidissement à l'eau en circuit fermé. Ses dimensions utiles sont de 200 x 200 x 200 mm.
Le banc de mesures à désorption est un cylindre d'une hauteur de 250 mm et de diamètre 200 mm. Il permet de mesurer le taux de dégazage surfacique selon la norme NF 60 – 584, et dispose désormais d'un enregistreur numérique financé par la région île de France.



Laboratoire d'Intégration de Diagnostics Optiques (Lido)



Le Laboratoire d'intégration de diagnostics optiques baptisé Lido est un local clos de 20 m², propre et sombre implanté dans Diva. Son accès est restreint aux personnels habilités. Il est pourvu d'un palan 1 t, d'une table optique de grandes dimensions ainsi que de nombreux composants d'optiques (lentilles, miroirs, sources de lumière, photodiodes, wattmètre…), mécaniques et d'imagerie (spectromètre, caméras CCD).
Il a pour fonction le montage, le réglage, l'étalonnage et le dimensionnement, dans un environnement adapté, de diagnostics optiques avant leur installation sur faisceaux d'ions. Récemment classé « zone laser contrôlée », un laser de classe 3R est actuellement utilisé pour des mesures de couplage optique et de transmission de l'ensemble de la chaîne optoélectronique d'un diagnostic optique pour le projet ESS. Elles ont pour but de maximiser la collection de lumière afin d'augmenter le ratio signal/bruit et aussi de corroborer ces résultats avec les simulations photométriques faites avec Apilux.

Laboratoire d'essais mécaniques

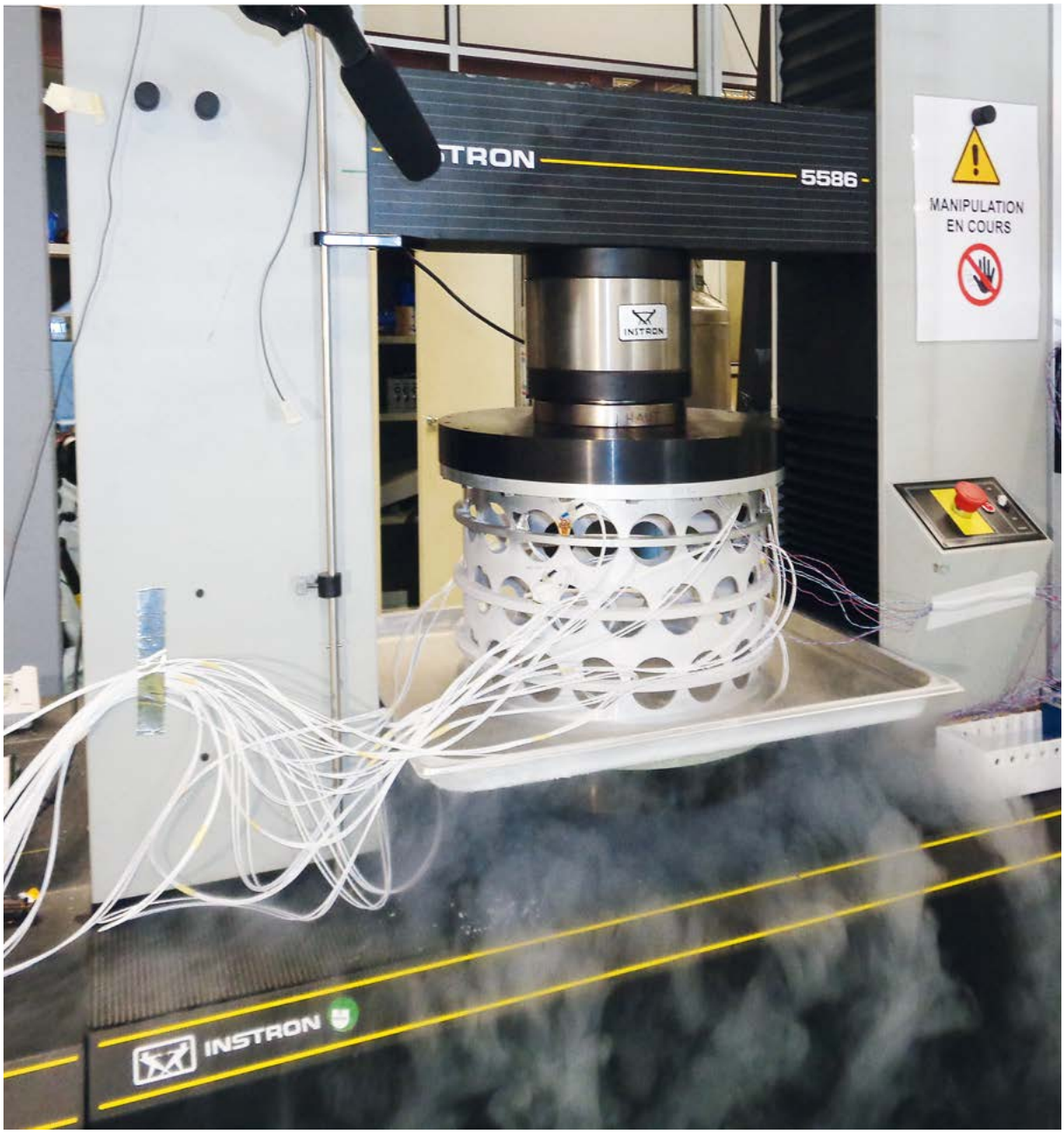
Le laboratoire d'essais mécaniques propose des mesures à 300 K et aux températures cryogéniques : 77 K (azote liquide) et 4,2 K (hélium liquide), permettant de déterminer les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, limite élastique, charge et allongement à la rupture et fragilité) de matériaux métalliques ou composites (composites synthétiques ou composés très anisotropes comme les supraconducteurs) ou le comportement d'assemblage complet en flexion, traction, compression ou glissement.

Le laboratoire a à sa disposition :

- Une presse hydraulique d'une capacité de 1 600 kN en compression.
- Une machine électromécanique Instron de 300 kN en traction et en compression.
- Une machine électromécanique Instron de 150 kN, en traction et en compression.

Cette dernière machine peut être équipée de 2 cryostats pour des essais à température cryogénique : l'un d'une capacité de 50 kN en traction ou flexion et l'autre d'une capacité de 80 kN en traction et 150 kN en compression.

Depuis 2013, une importante campagne de tests a été réalisée sur l'optimisation (matériau, serrage, préparation de surface) de la friction sur les systèmes d'accrochage des « Outer Intercoil Structure » du tokamak JT-60SA .



Laboratoire de bobinage

Le laboratoire de bobinage, destiné à la réalisation de bobinages prototypes de dimension limitée, dispose d'une machine à bobiner à axe vertical de grande capacité, une machine à bobiner à axe horizontal et une machine à bobiner munie d'un axe vertical et un axe horizontal permettant de réaliser des bobines de géométrie plus complexe. Chacune de ces machines est équipée d'un frein permettant le contrôle de la tension mécanique sur le conducteur. Une presse hydraulique de 1500 tonnes, équipée d'un système de chauffage, permet de réaliser une chauffe sous contrainte mécanique (polymérisation, collage…). Un four permet de réaliser les traitements thermiques à haute température, jusqu'à 800 °C, sous vide ou en balayage de gaz neutre, nécessaires aux réactions de formation du Nb_3Sn. Un banc d'imprégnation de résine sous vide complète l'équipement de ce laboratoire.

Atelier mécanique

Les missions de l'atelier mécanique sont :

- De répondre aux demandes de travaux spécifiques et urgents en cas de modifications ou de reprises imprévues.
- D'apporter une assistance technique à travers les connaissances mécaniques de son personnel aux différents projets du service (JT-60SA, R^3B, Gbar, Iseult, XFEL, Ifmif, Eucard2, ESS, etc.) ainsi que de participer à la réalisation des prototypes.

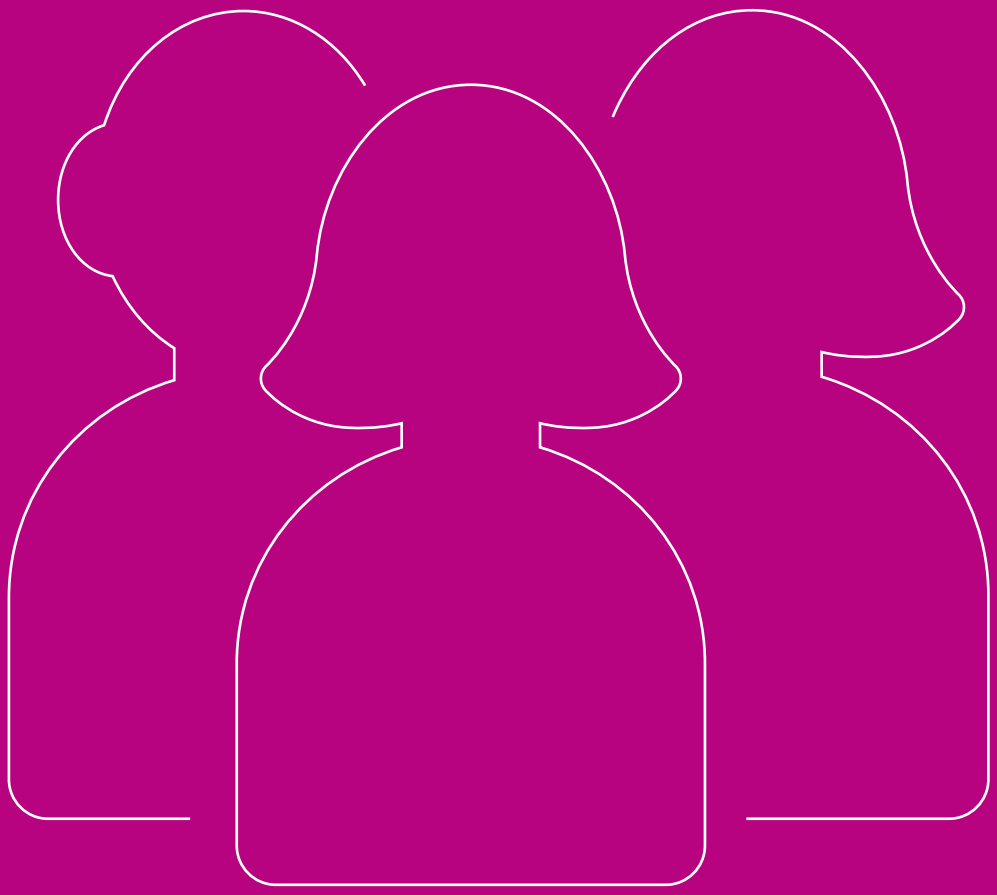
À ces fins, il est équipé d'un ensemble de machines comprenant notamment :

- Des tours horizontaux, des fraiseuses, des perceuses, d'une rectifieuse plane, d'une scie à ruban, et d'une cisaille guillotine pour les principaux. L'atelier gère également un magasin de matières premières pour les dépannages et travaux urgents.

Une partie de l'atelier est spécialement équipée pour permettre l'usinage de matériaux fibreux ou pulvérulents. Cela permet d'effectuer ces travaux en préservant le personnel et les machines des dangers introduits par ce type d'usinage.

les SUPPORTS

SACM **2013-2015**



les
SUPPORTS
SACM **2013-2015**

informatique/secrétariat

La cellule informatique

Pour leurs activités de recherche, les ingénieurs chercheurs, thésards et post-docs, techniciens disposent de moyens informatiques scientifiques, bureautiques fixes et nomades. Soit 523 appareils en 2015, en comptabilisant le matériel en libre-service, mais aussi les appareils connectés pour les expériences et la sécurisation des installations.

L'équipe informatique assure l'approvisionnement régulier en matériel, sa mise en service et l'assistance quotidienne auprès des utilisateurs. Elle administre les différents moyens informatiques et elle sécurise au mieux ces outils en étroite collaboration avec le SEDI. Pour cela, elle s'appuie sur la charte NIG608 pour sensibiliser le personnel du SACM aux règles des bonnes pratiques de l'informatique.

Service d'excellence, le SACM s'intègre parfaitement dans des collaborations internationales, et dans la dynamique des projets, il dispose de trois salles visioconférences lui permettant de participer et d'échanger avec les grands organismes de recherche internationaux des informations de manière rapide et précise et moderne.

Le service, est informé en temps réel par l'intermédiaire de ses 5 écrans interactifs placés dans ses bâtiments, des actualités, des faits marquants et de la venue des nouveaux arrivants.

Dans sa campagne ISO 14001, le SACM a élaboré en interne une feuille d'heures électronique individuelle, se débarrassant des taches rébarbatives de distribution, de classement, de vérification et de validation. Prônant le zéro papier, nous avons surpassé nos objectifs en responsabilisant chaque agent tout au long du parcours de cette feuille. D'autre part, le service a aussi instauré lors de l'utilisation de ses copieurs le mode d'impression sécurisé, qui a permis de diminuer considérablement le nombre d'impressions inutiles et orphelines, et ainsi de permettre au SACM de réduire les dépenses liées aux photocopieurs.

Les secrétariats

L'équipe administrative du SACM se compose de 3 trois secrétariats disposés dans les différents secteurs de notre installation.

Près de la tête du service, le **secrétariat de direction**, attaché au fonctionnement du service et directement aux activités du chef de service, gère toutes les tâches administratives d'intérêt général ainsi que la gestion des dossiers du personnel permanent (128 personnes en 2015). La mise à disposition des fournitures de bureautique et papeterie est aussi à la charge de ce poste.

Au plus près des équipes, **deux autres secrétariats techniques** sont dédiés aux activités des laboratoires et des projets. La secrétaire côté cryomagnétisme couvre l'assistance opérationnelle et les projets du LCSE et du LÉAS ainsi que le suivi du personnel temporaire (CDD, thésards, stagiaires, apprentis, collaborateurs), alors que la secrétaire attachée aux secteurs des accélérateurs couvre les activités opérationnelles et les projets du LÉDA, LISAH et LIDC2. L'aide aux projets consiste en la rédaction et mise en forme de documents et à leur archivage papier et numérique. L'aide à l'organisation de séminaires ou de réunions de suivi des projets sur le site de Saclay fait aussi partie des activités à gérer.

Outre les spécificités de chaque laboratoire, les 3 secrétariats assurent les missions générales que sont la gestion du courrier, les missions et leurs liquidations, les commandes SAP, Pacha et magasin central, les inscriptions conférences et congrès, les demandes d'accès pour nos visiteurs, les calendriers des astreintes, les mises à jour des annuaires et listes de personnel, composition des laboratoires ainsi que les remboursements de frais.

Le nombre croissant de projets et l'augmentation avec un turn-over plus important en personnel temporaire ont notablement accru le nombre de tâches réalisées quotidiennement (en 2015, près de 1 000 commandes externes et plus de 150 internes ont été passées, 250 missions et plus de 80 inscriptions en conférences, workshop ou congrès).

les
SUPPORTS
SACM **2013-2015**

qualité, sécurité et environnement

Prévention des risques professionnels et environnementaux

Les activités du Service rassemblent toutes les sources de danger possibles : risques physiques, chimiques, électriques, incendie, biologiques, humains, environnementaux, etc. Pour les maîtriser, l'équipe « sécurité-environnement » applique les démarches de prévention et de protection déployées par le CEA. L'objectif est de respecter les codes du travail, de la santé publique et de l'environnement. Certaines activités sont soumises aux autorisations de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de la Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE).

Installation 82 - Manutention mécanisée de l'aimant R3B-Glad dans le bâtiment 198.

PRÉSENTATION

Les 2 périmètres de sécurité, les installations 82 et 218, sont répartis sur 32 000 m² dans 18 bâtiments certifiés ISO 14001. Ils représentent un effectif moyen de 200 salariés (dont 34 personnels Alsyom, industriel affecté au projet XFEL), 5 lots d'Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et 7 Équipes locales de premiers secours (ELPS).

ORGANISATION

L'équipe « sécurité-environnement » est composée d'un Chef d'installation (CI), de deux CI suppléants, un Ingénieur de sécurité d'installation (ISI) et plusieurs Animateurs de sécurité (AS). L'ISI assure également les missions d'Interlocuteur environnement (IE), de Correspondant déchets (CD), et de Gestionnaire de sources radioactives (GSR). Compte tenu des nombreuses activités, 41 chefs d'exploitation (titulaires et suppléants) relayent l'équipe sécurité sur certaines de leurs missions. Le management sécurité se fait en liaison avec les équipes de support du site : Formation Locale de Sécurité, radioprotectionnistes, médecins du travail, services techniques, et cellule Qualité Sécurité Environnement.

La multiplicité des interférences est gérée en collaboration avec les chefs d'exploitation, les chefs de projets, et les chefs de laboratoire concernés. En complément, toute nouvelle manipulation ou demande d'expérience, fait l'objet, a minima, d'une autorisation préalable du Chef d'installation.

L'INSTALLATION N° 82

Elle concerne les laboratoires LCSE et LÉAS et regroupe les activités des stations d'essais cryomagnétiques et les laboratoires d'isolation-imprégnation, de bobinage, d'intégration, de mesures magnétiques et l'atelier mécanique. La station de liquéfaction d'hélium produit et gère en moyenne 150 000 litres d'hélium/an. La période 2013-2015 est marquée par :

- Les opérations d'assemblage et de tests de l'aimant R³B-Glad de 59 t.
- Les transferts, chargement, et transport jusqu'en Allemagne de l'aimant R³B-Glad.
- Le test des équipements du projet Iseult sur les stations d'essais cryomagnétiques (alimentations, cryoshim).
- L'implication de l'équipe sécurité dans le cadre des collaborations à l'étranger (Ifmif, R³B-Glad, Minos…).
- Les divers chantiers visant à diminuer la consommation des ressources au sein du SACM (isolation thermique de toitures, mise en œuvre de variateurs de vitesse pour adapter la consommation à la demande, installation de système de refroidissement par eau en circuit fermé).

L'INSTALLATION N° 218

Créée en 2005 après le déclassement de l'Installation nucléaire de base (INB) n° 48 du synchrotron à protons « Saturne » elle regroupe les laboratoires LÉDA, LIDC2 et LISAH dédiés au développement et aux tests de systèmes d'accélérateurs de particules. Cette plateforme met en œuvre d'importantes infrastructures techniques : sources de puissance radiofréquence (klystrons à 352 MHz ou 704 MHz de 1,2 MW RF), salles blanches ISO 4 et ISO 5, liquéfaction d'hélium à 4,2 K, alimentations électriques 4 MW, tour aéroréfrigérante de 8 MW thermique, traitements de surface par acides très toxiques (mélange fluorhydrique – sulfurique par exemple), entre-autres. L'aménagement des halls pour accueillir les nombreux projets et stations d'essais de l'installation (Cryholab, CV1 & CV2, XFEL, Spiral 2, Iphi, Ifmif, GBar, Cocase, JT-60SA, ESS, Saraf) occasionnent des chantiers multiples et de grande envergure avec des co-activités importantes.

Installation 218 – Exploitation industrielle du projet XFEL.

En termes de maîtrise des risques, les faits marquants de la période 2013-2015 sont :

- La construction et la réception de la station d'essais cryomagnétiques pour JT-60SA.
- La livraison de la première des 18 bobines de JT-60SA.
- Le renforcement de la radioprotection des tests de cavités sur la plateforme Supratech/Cryo HF.
- La construction de l'espace d'intégration des cryomodules ESS, dite « Böth ».
- La phase de réalisation industrielle des cryomodules XFEL (90 cryomodules livrés sur 100).
- Le déménagement, l'installation et le démarrage de l'injecteur Ifmif au Japon.
- L'aménagement de la station Cryholab pour le projet Ifmif/Sathori.
- La mise en route et la réception au Ganil de l'injecteur Spiral2 précédemment testé au SACM.
- L'intégration et les tests des cryomodules de Spiral2.
- La création du laboratoire Diva.
- La création d'une nouvelle salle blanche ISO 5 dédiée au projet ESS et à la R&D.
- L'évacuation de 104 sources radioactives sans emploi vers la filière du CEA Saclay « CERISE ».
- Les prestations de caractérisation des déchets nucléaires « historiques » et l'autorisation d'enlèvement vers l'Andra (projet EXOTI).

INDICATEURS D'ACTIONS ET RÉSULTATS SÉCURITÉ POUR LA PÉRIODE 2013-2015

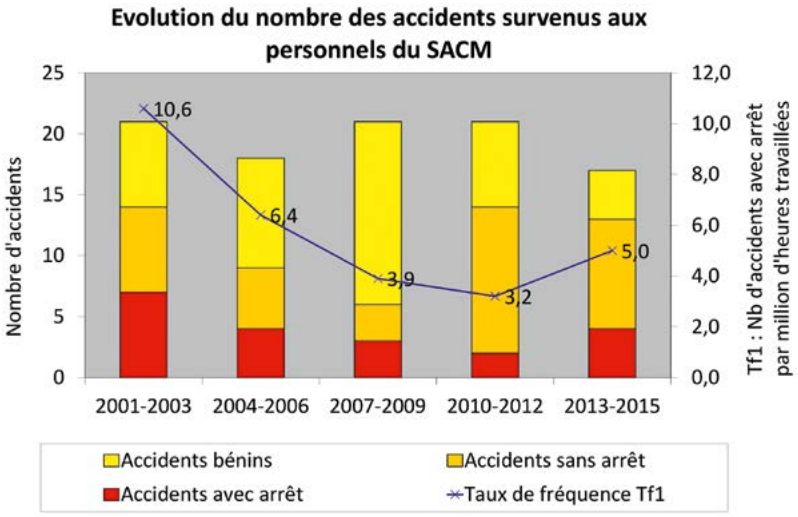
Le SACM est l'un des services qui présentent le plus de projets en requête d'exploitation devant la Commission locale de sécurité (CLS) du CEA Saclay.

Depuis sa création en 2001, les résultats sécurité du SACM s'améliorent globalement, notamment par la diminution de la fréquence et de la gravité des accidents survenus à ses personnels. Entre 2013 et 2015, le nombre d'accidents avec arrêt de travail par million d'heures travaillées (Tf1) a augmenté et ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction de - 5 % demandé par le CEA. Toutefois, il faut noter que l'activité technique et les effectifs du service ont augmenté et que le faible nombre d'événements (0 à 2 accidents avec arrêt par an) pour un tel niveau d'effectif, occasionnent de fortes variations du Tf1 objectif.

Pour les années à venir, les principaux objectifs sont :

- La valorisation du patrimoine du SACM.
- L'assainissement des déchets nucléaires historiques.
- L'amélioration des résultats sécurité et le maintien des performances en matière prévention.
- L'optimisation de l'exploitation de la plateforme technologique multi projets qu'est le Synergium.
- La réussite des projets Irfu nouveaux ou en cours (JT-60SA, Iphi, ESS, Ifmif, Saraf, etc.).

	Total SACM
Dossiers de sécurité CLS, ASN, ICPE	17
Visites de sécurité	34
Exercices de sécurité	10
Audits et inspections	12
Chantiers et affaires sous-traitées diverses	260
Plans de prévention et protocoles sécurité	150
Permis de feu	260
Nouveaux arrivants accueillis	175
Salariés en formation sécurité	200
Réunions d'exploitation	75
Réunions de plan d'occupation des sols	12
Campagnes de radiographies X pour XFEL	130



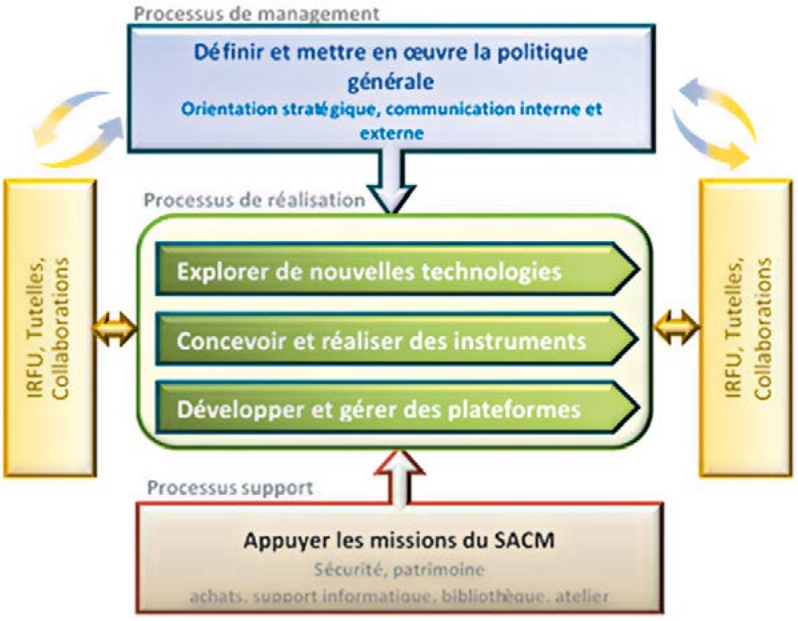
La qualité

Le système qualité déployé s'inscrit en parfaite cohérence avec la politique qualité de l'Irfu et de la DSM, il repose à la fois sur les 3 correspondants qualité du Service qui se répartissent les activités suivant les activités support et management, les projets accélérateurs, les projets aimants et cryogénie.

Les correspondants ont pour mission de mettre en place des outils pour harmoniser les pratiques des différents Laboratoires et de proposer des actions d'amélioration pour les activités supports du Service comme la sécurité, le suivi des plans de charges ou la gestion/répartition de la main-d'œuvre, ils se réunissent périodiquement pour dresser l'état d'avancement des actions.

Ils apportent également leur soutien aux projets qui ne disposent pas d'ingénieur qualité. Le correspondant qualité « activités support et management » est en relation avec le responsable qualité de l'Institut et avec les correspondants qualité des autres Services, ce qui permet d'assurer la cohérence avec la politique qualité de l'Irfu.

Une des actions menées a été la mise en œuvre d'une plateforme de Gestion Électronique des Documents I2I (https://ged-extra-sacm.cea.fr) afin de pérenniser le stockage des documents des Laboratoires.



Cartographie des processus du SACM.

Cette plateforme optimise la recherche et la consultation des documents, elle est accessible à tout le personnel du Service.

La démarche qualité s'appuie sur une description des activités du Service synthétisée sous forme de cartographie des processus. L'analyse des missions et des activités a permis de déterminer les différents processus interagissant au sein de notre Service, 3 processus de réalisations ont été identifiés. Le référentiel qualité en cours de rédaction précisera le fonctionnement de chacun des processus et identifiera leurs interactions.

Assurance qualité : CEA/DSM suivi de projet d'après les règles générales ISO 9001 bien que nous ne soyons pas ISO 9001. Chaque projet defini un Plan Qualité dédié et basé sur un cadre commun Irfu.

Le système de management de la qualité déployé sur la plupart des projets du service est mis en place pour fournir des produits conformes aux exigences des instruments et aux exigences réglementaires afin d'obtenir la satisfaction des partenaires de la communauté scientifique. L'engagement du service dans plusieurs programmes internationaux a nécessité le recrutement de techniciens et d'ingénieurs qualité pour pouvoir garantir la conformité de nos prestations.

DIFFUSION du SAVOIR

SACM **2013-2015**

Communication

La communication interne repose principalement sur des séminaires périodiques à caractère technique et scientifique dans lesquels l'ensemble du personnel est invité à partager des connaissances connexes aux nombreuses activités qui sont menées dans le service. Le service regroupe des moyens importants et des installations qui lui donnent une grande visibilité via des évènements et des visites étendus à un public élargi aux institutions, aux professionnels du secteur, aux étudiants et lycéens. Nous participons très activement aux actions de communication du CEA en nous ouvrant à la presse, aux médias et au grand public.

Si l'équipe communication s'articule autour de 3 ou 4 personnes pour l'organisation et la centralisation des demandes, ce sont plus de 50 physiciens, ingénieurs et techniciens qui interviennent régulièrement pour répondre à l'ensemble des sollicitations dans leur secteur d'activité. Les séminaires hebdomadaires internes font le tour des activités techniques et scientifiques d'actualités. Nous accueillons régulièrement des intervenants externes, spécialistes de nos secteurs d'activités, pour enrichir nos connaissances et entretenir les relations avec les laboratoires du monde entier. Annuellement, le Service organise des évènements plus généraux comme le « goûter Posters » qui a lieux à la fin de la saison des conférences.

Nous organisons et participons à l'organisation d'évènements et de conférences accessibles à tous types de publics. Les 25000 m^2 d'aires expérimentales du SACM, regroupent 25 plateformes techniques qui sont autant de points de visite ouverts à plus d'un millier de visiteurs par an. Ces points de visites sont adaptés et mis à jour en fonction de l'évolution des activités et des projets. Sur la période 2013-2015, au-delà des publications scientifiques et des missions d'éducation auprès des lycées et universités (conférences et accueil de stagiaires), le SACM a participé à plusieurs rendez-vous médiatiques comme l'émission thématique sur Neurospin, diffusée sur Itélé à l'occasion des 70 ans du CEA et des articles et des vidéos sur les aimants et les accélérateurs réalisés avec les unités de communication du CEA. Pour le grand public, nous avons également couvert des évènements comme la fête de la science, les Utopiales à Nantes en 2014 ou l'exposition sur le collisionneur LHC pour les 60 ans du Cern. Nos chercheurs ont également répondu à quelques interviews pour la presse scientifique. Nous tenons régulièrement à jour notre site web qui reflète la vie du service au travers de nos projets techniques et scientifiques : http://irfu.cea.fr/Sacm/

Enseignement

CERN Accelerator School – Erice, Italy 2013.

La physique des accélérateurs et leurs technologies associées, les systèmes cryogéniques ainsi que les aimants supraconducteurs destinés à la recherche fondamentale sont des disciplines qui trouvent toute leur place dans l'enseignement supérieur. Elles sont généralement enseignées au niveau Master (ou équivalent) conjointement avec la physique des particules ou la physique des plasmas. Au cours de ces trois dernières années, une quinzaine de chercheurs de l'Irfu/SACM ont effectués environ 150 heures d'enseignement (cours et Travaux Dirigés) dans les domaines suivants :

- Électromagnétisme
- Dynamique du faisceaux
- Hyperfrequences
- Supraconductivité
- Cryogénie
- Vide
- Hygiène, Sécurité et Environnement

De plus, les infrastructures expérimentales du SACM ont été utilisées pour dispenser plus de 50 heures de Travaux Pratiques de Master 2 portant sur des thèmes comme la cryogénie, le transport d'ions de basse énergie, la qualification de faisceau d'électrons.
L'ensemble des activités d'enseignement ont été effectuées pour les formations ou les établissements suivants :

- Master 2 NPAC et Grands Instruments de l'université de Paris-Saclay
- Master 2 Université Marne la Vallée
- Master 2 Physique des Plasmas et de la Fusion
- Institut National des Sciences et Techniques Nucléaire (CEA)
- CNRS-IN2P3
- Estaca
- Esme-Sudria

Par ailleurs, des intervenants et des enseignants émanant du SACM participent régulièrement à des écoles d'accélérateur françaises ou européenne comme la CERN Accelerator School, la Joint Universitiy Accelerator School, la MAX accelerator school, la Control and instrumentation school 2013 du programme de fusion nucléaire, l'école "Dimensionnement des Cryostats" de l'Association Française du Froid ou encore la formation continue de l'association française du vide.

Enfin trois membres du SACM ont apporté des contributions notables au MOOC (Massive Open Online Course) « Des particules aux étoiles » de l'université Paris-Saclay[1] dans le domaine des sources d'ions, des accélérateurs et de la supraconductivité.

Finalement, le service contribue à la formation des étudiants en proposant régulièrement des stages de niveau DUT, Licence, Master 1&2 et Grandes Écoles. Sur la période, nous avons accueilli 50 stagiaires, 2 contrats d'apprentissage, 3 thèses et 2 post-docs.

[1] https://www.fun-mooc.fr/courses/ParisSaclay/71001S02/session02/about

TYPE D'ENSEIGNEMENT	NOMBRE D'HEURES
Cours et Travaux Dirigés (Universités/écoles d'ingénieurs)	150
Travaux Pratiques	56
Écoles Thématiques	38
MOOC	3

Le tableau suivant résume le nombre d'heures d'enseignement données par des membres du SACM entre 2013 et 2015.

REVUE, CHAPITRE…

◆ **Propriétés des matériaux à basse température**
Techniques de L'ingénieur, BE9811, 10 Octobre 2015

◆ **Transfert de chaleur à basse température**
Techniques de L'ingénieur, BE9812, 10 janvier 2015

◆ **Sécurité en cryogénie**
Techniques de l'ingénieur, BE9814, 10 avril 2015

COURS, ÉCOLES…

◆ **Heat Transfer and Cooling Techniques at Low Temperature**
◆ **Large Superconducting Magnet Systems**
◆ **How to Achieve the Best SRF Performance**
Cern Accelerator School: Course on Superconductivity for Accelerators (24 Apr - 4 May 2013, Erice, Italy)

◆ **Low Temperature Measurements**
Control and Instrumentation School 2013, Nuclear Fusion Programme, Goal Oriented Training Programme Cryogenics Training Programme for Fusion, CEA, June 13th 2013

◆ **Transferts de chaleur et méthodes de refroidissement aux basses températures**
Études de cas : Le cryostat XFEL - La cryogénie de l'aimant hybride LNCMI
Techniques d'assemblage : Cryomodules Accélérateurs - Assemblage de l'aimant R³B
École Dimensionnement des Cryostats, Association Française du Froid
Commission de Cryogénie et de Supraconductivité, Autrans, 18-20 mars 2014

◆ **Transferts de chaleur et méthodes de refroidissement aux basses températures**
Société Française du Vide - Formation continue - Connaissance et pratique de la cryogénie - Conception de systèmes cryogéniques, IUT Orsay 12-15 mai 2014

◆ **Transferts de chaleur et méthodes de refroidissement aux basses températures**
Société Française du Vide - Formation continue - Connaissance et pratique de la cryogénie - Conception de systèmes cryogéniques, IUT Orsay 8-11 juin 2015

◆ **Thermodynamique des cryofluides**
Société Française du Vide - Formation continue - Connaissance et pratique de la cryogénie - Utilisation d'équipements cryogéniques, IUT Orsay 5 octobre 2015

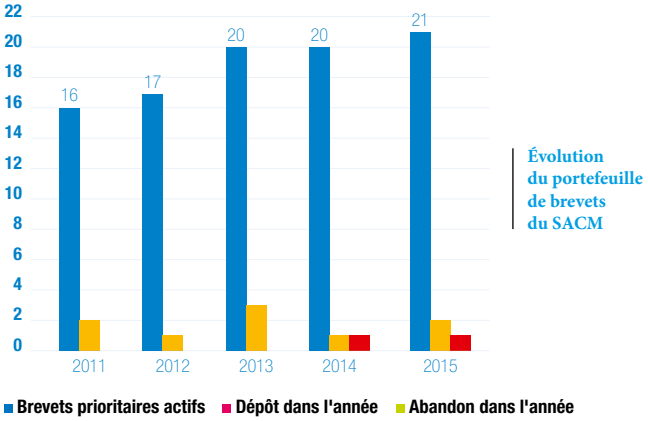
◆ **Techniques de base des détecteurs, Cargèse 2013 et 2015**
Cryogénie, Supraconductivité et Vide
École IN2P3

◆ MOOC (Massive Open Online Course) « Des particules aux étoiles ».

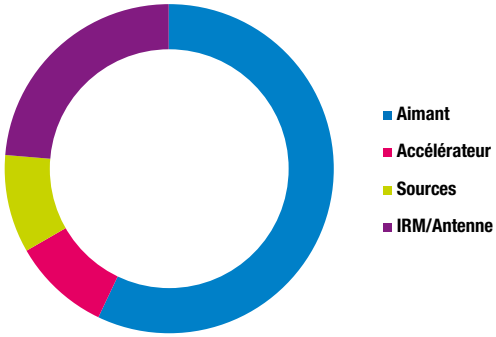
Valorisation - Transfert de Technologie

PORTEFEUILLE DE BREVETS

Le portefeuille de brevet du Sacm est composé de 20 brevets prioritaire actifs en 2015.



Évolution du portefeuille de brevets du SACM



Répartition des brevets du SACM en vigueur en 2015

BRIGHTNESS

Dans le cadre du projet ESS, le programme BrightnESS, financé par le programme européen pour la recherche et l'innovation H2020, est destiné à renforcer l'infrastructure de recherche ESS et à développer les synergies avec les partenaires industriels. Débuté en septembre 2015, ce projet de 3 ans a un budget d'environ 20 M€ avec la contribution de dix-huit instituts de onze pays européens. Le CEA participe à ce projet avec le triple objectif de soutenir l'implication des industries françaises, de renforcer la contribution en nature de la France pour ESS et de développer un réseau industriel.

POSITHÔT - LA MANUFACTURE D'ANTIMATIÈRE

POSITHÔT - la manufacture d'antimatière - est une start-up qui conçoit et commercialise des générateurs de positons - l'anti-particule de l'électron- issus des développements réalisés à l'Irfu pour la physique fondamentale. Cette technique brevetée, issue du CEA, est une rupture technologique dans la production de positons. L'appareil s'implante là où se trouve le besoin du client, ce qui révolutionne l'usage de l'analyse par positons.
L'utilisation de ces générateurs - non radioactifs et transportables - permettra de développer l'analyse des matériaux et des surfaces par spectrométrie d'annihilation de positons, technique non destructive particulièrement adaptée pour le développement des substrats et dopages spéciaux dans l'industrie des semi-conducteurs, les couches minces et interfaces, la caractérisation des techniques de porosification, l'étude des défauts d'irradiation et la caractérisation des effets de fatigue des matériaux avant l'apparition des fissures. Ces générateurs délivrent un flux de 50 à 200 fois supérieur à celui des sources radioactives conventionnelles, pour un coût spécifique des positons divisé par 3.

À partir de 2017, les laboratoires de recherche intéressés disposeront en permanence d'un flux comparable à celui d'un réacteur nucléaire de recherche, sans devoir supporter les contraintes liées à l'exploitation d'une installation nucléaire.

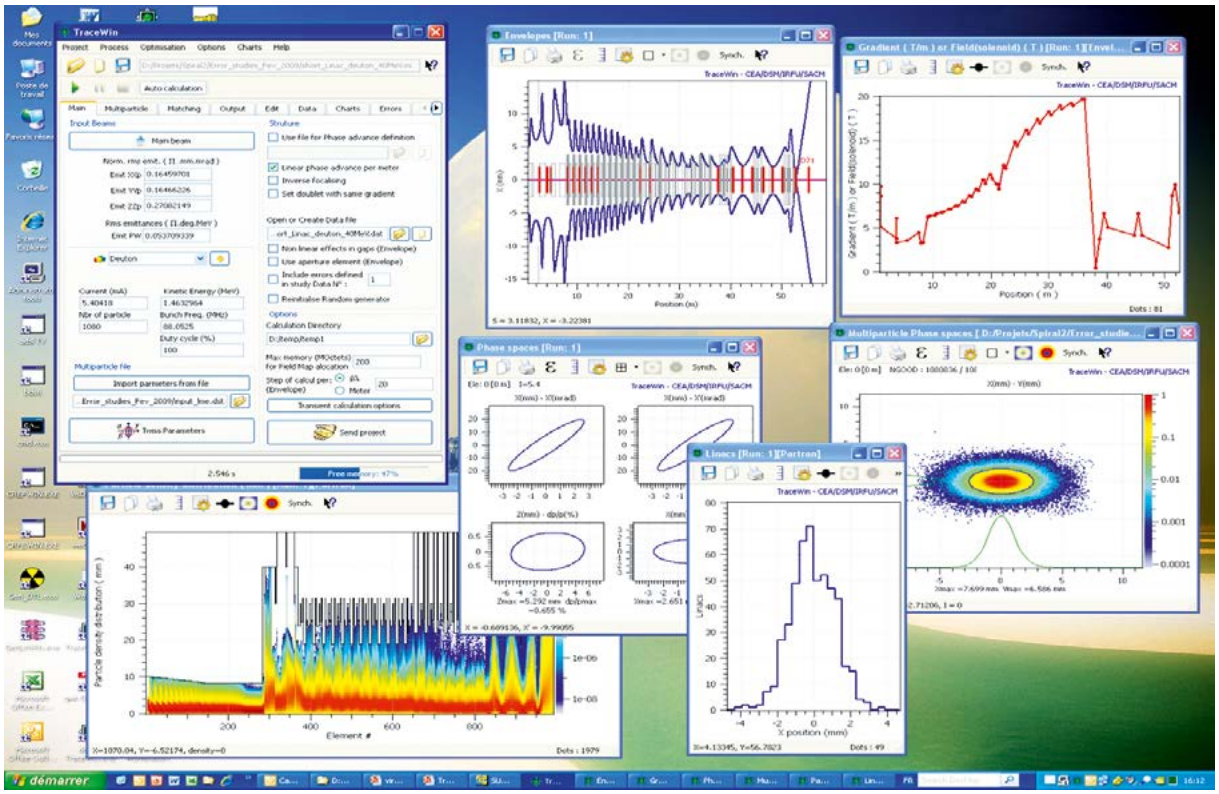
VALORISATION SILHI2

Photo d'une source SILHI2® vendue par la société Pantechnik.

Dans la cadre du développement des accélérateurs de forte intensité, le CEA a initié, en 1995, le développement d'une nouvelle source d'ions à résonance électronique cyclotronique, la source Silhi, produisant 100 mA de protons à 100 keV. Les résultats obtenus ont permis au CEA de produire des sources équivalentes pour les projets Ifmif-LIipac et Fair. Une nouvelle configuration magnétique en aimants permanents a permis la réalisation de sources plus simples et moins intenses dont une pour le projet Spiral2. Début 2013, un partenariat avec la société Pantechnik, située à Bayeux (Calvados), a été conclu pour la commercialisation de ce type de sources appelées Silhi2® et dérivées de la source originale Silhi. En 2013 et 2014, deux sources de ce type ont été vendues par la société Pantechnik à des laboratoires de recherche en Inde et en Chine pour produire respectivement des faisceaux de protons et de deutons avec des énergies et intensité de 50 keV et 50 mA.

LICENCES DYNAMIQUE FAISCEAUX

Dans les années 90, le besoin en faisceaux de forte intensité d'ions légers est apparu clairement dans de nombreux domaines d'applications. Toutes réclament des accélérateurs linéaires de très forte puissance. La nécessité de disposer d'outils de simulations performants, capables de calculer précisément la propagation et la dégradation des propriétés d'un faisceau dans un accélérateur s'est alors imposée. Une suite de codes consacrée à ce défi fut donc développée au SACM. Distribuée depuis les années 2000, elle s'est imposée comme une référence dans la communauté des accélérateurs de haute intensité. Ces codes ont ainsi permis de définir les accélérateurs des projets Spiral2, Linac4, Ifmif, ESS, Saraf, Myrrha, SPL, Iphi, Janus, Aglae… pour ne citer que les principaux. Ils ont fait l'objet de nombreux benchmarking et furent à plusieurs reprises validés expérimentalement. Cette suite logicielle professionnelle est aujourd'hui diffusée sous licence CEA depuis 2009 à plus de 50 laboratoires tels que le Cern, ESS, Fermilab, Barc, IPNO, INFN, GSI, Riken, RAL, LPSC… à travers 19 pays. Un site internet pour le téléchargement et la promotion via les moteurs de recherche internet a été créé : http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/. De plus une « hot line » est assurée par le SACM pour l'assistance aux utilisateurs.



Exemple de sorties graphiques du code de simulation de transport de particules TraceWin.

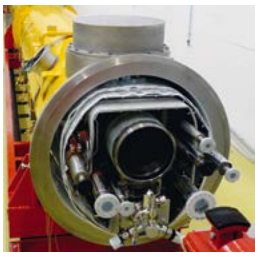
Faits marquants

ACCÉLÉRATEURS

2013

04 NOVEMBRE

Tests réussis à Desy du premier cryomodule XFEL intégré par le CEA
Le premier cryomodule de préséries du projet E-XFEL, intégré par le CEA et testé à DESY, a produit un champ accélérateur moyen de 32,4 MV/m par cavités accélératrices, largement supérieur à la spécification de 23,6 MV/m du projet.



Train de cavités du cryomodule XM-3 en salle blanche ISO4.

2014

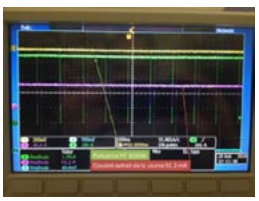
04 SEPTEMBRE

Répétition à Saclay de l'assemblage de la cavité radiofréquence RFQ de Spiral2
La procédure et les outillages d'assemblage des tronçons de la cavité RFQ du projet Spiral2 ont été validés à Saclay. Les deux tronçons ont été assemblés avec succès, permettant ainsi de valider l'obtention de la précision drastique requise pour les aligner ainsi que le niveau d'étanchéité necessaire pour y faire régner l'ultra vide. Les tronçons ont été démontés et sont prêts à être expédiés au Ganil où le montage final va débuter le 8 septembre.

Chaque tronçon est mesuré sur une machine de contrôle tridimensionnel avec une précision de 2 à 5 microns.

09 SEPTEMBRE

Succès des tests à Saclay des 2 premières sources d'ions SILHI2® fabriquées par Pantechnik
Dans le cadre du partenariat avec la société Pantechnik, située à Bayeux (Calvados) qui a été conclu en 2013 pour la commercialisation de la source appelée Silhi2® , le SACM a testé avec succès en juillet et août 2014 sur le banc Betsi1, les deux premières sources fabriquées par l'entreprise.



La source en mode faisceau continu. Vert : puissance HF (Watt). Rose : Courant extrait de la source (mA) toutes espèces confondues.

1ER NOVEMBRE

Accord de coopération pour la réalisation de l'accélérateur Saraf
Ce 28 octobre 2014, l'Administrateur Général et le Directeur de la DSM viennent de signer un contrat avec le centre de recherche israélien de Soreq (SNRC) pour la réalisation d'un accélérateur nommé Saraf (Soreq Applied Research Accelerator Facility) par les équipes de l'Irfu et, si nécessaire, le soutien d'autres laboratoires. Cet accord se concrétise par des phases d'études préliminaires et détaillées sur une période de 18 mois (2015 et 2016) ouvrant vers une phase de construction, de tests et d'installation sur le sitequi durera 6 ans.

Maquette d'une partie de l'accélérateur SARAF réalisée par l'imprimante 3D du bureau d'étude de l'Irfu.

04 NOVEMBRE

Premier faisceau d'ions Ifmif sur le site de Rokkasho au Japon
La plateforme internationale d'irradiation des matériaux pour la fusion (Ifmif) est l'un des projets découlant de l'accord sur l'approche élargie, un partenariat dans la recherche sur l'énergie de fusion entre l'Europe et le Japon. Ifmif est une source de neutrons à base d'accélérateur qui produit, en utilisant des réactions nucléaires deutérium-lithium, un grand flux de neutrons semblable à celle prévue lors de la première paroi d'un réacteur de fusion. Deux étapes importantes ont été franchies début novembre 2014 au Linear Accelerator Ifmif Prototype (Lipac): l'accomplissement du premier plasma d'hydrogène dans la chambre d'ionisation et la première extraction d'un faisceau d'ions (H +). Les tests se poursuivent pour retrouver les caractéristiques nominales de l'injecteur. Le premier faisceau de deuton sera produit début 2015.

2015

31 AOÛT

E-XFEL : livraison de 60 cryomodules

Dans le cadre du projet E-XFEL (European X-ray Free Electron Laser) , l'Irfu participe à la construction d'un accélérateur supraconducteur en Allemagne (laboratoire Desy) en intégrant et testant les cryomodules. Le cap de 60 cryomodules, sur un total de 103, a été franchi le 26 août 2015 grâce à une cadence d'intégration de 4 jours par module. L'expédition du 103e cryomodule est prévue fin avril 2016. Le délai est respecté et les performances des modules sont excellentes: sur les 55 modules testés, le gradient accélérateur atteint en moyenne 27,4 MV/m, soit 16% de plus que la spécification. 33 cryomodules, sur un total de 101, sont déjà installés dans le tunnel de l'accélérateur linéaire à électrons de 1,5 km de long.

Les premiers cryomodules installés dans le tunnel de l'accélérateur.

28 OCTOBRE

Spiral2 : 12 cryomodules tout chauds livrés au Ganil

12 cryomodules, consitués chacun d'une cavité accélératrice en matériau supraconducteur et de son systéme de cryogénie, sont désormais en cours d'installation sur l'accélérateur linéaire de particules Spiral2 au Ganil (Caen). Entre sprint et marathon, l'équipée constituée de 60 collaborateurs du SEDI, SACM et SIS, ont mené ce projet commencé en 2005, de sa conception à sa phase de qualification après assemblage. Sur la ligne d'arrivée, 12 cryomodules en tous points conformes au cahier des charges : champ accélérateur supérieur à 6,5 MV/m pour des pertes thermiques inférieures à 21,5 W. Leur mise en en froid est prévue au premier semestre 2016, année de mise en service de Spiral2. Ce dernier permettra de produire des ions radioactifs accélérés, afin d'étudier la structure nucléaire des ions exotiques.

Les premiers cryomodules installés dans le tunnel de l'accélérateur.

05 NOVEMBRE

Démarrage du projet européen EuPRAXIA pour un accélérateur plasma piloté par laser

En s'impliquant fortement dans le projet européen EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications), le CEA, le CNRS et Soleil confirment leur engagement dans les nouvelles techniques d'accélération plasma piloté par laser. D'ici à la fin 2019, EuPRAXIA produira un rapport d'étude de conception sur le premier accélérateur plasma mondial de 5 GeV, desservant des aires expérimentales dédiées et avec la qualité de faisceau requise par les utilisateurs. Fort de son expérience en conception de systèmes d'accélération, en dynamique de faisceaux et de sa contribution à l'expérience d'accélération plasma dans le cadre de Cilex (Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême) l'Irfu est fortement impliqué dans la simulation, le transport et la manipulation du faisceau d'électrons.

Vue de l'expérience ELISA, précurseur de l'accélération LASER, piloté par le laser UHI 100 de l'Iramis/Lidyl (collaboration LPGP-IRFU-LIDyL-LLR-LAL) Credit: CEA/LIDyL.

MAGNÉTISME

2014

02 JUILLET

Le prix de création d'entreprise innovante remis à Jean-Michel Rey

Jean-Michel Rey, ingénieur dans l'équipe de l'expérience GBAR a reçu le 1er juillet un prix (parmi 50 lauréats) dans le cadre du 16e concours national de création d'entreprises innovantes organisé par le Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et BPI France dans la catégorie « création-développement » pour assurer la création de POSITHÔT – la Manufacture d'Antimatière – Cette start-up industrialisera des générateurs de positons issus des développements réalisés à l'Irfu pour la physique fondamentale.

POSITHÔT

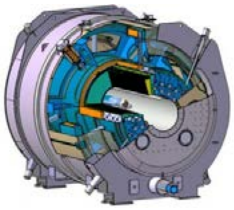
La source en mode faisceau continu. Vert : puissance HF (Watt). Rose : Courant extrait de la source (mA) toutes espèces confondues.

2015

27 NOVEMBRE

Aimant Iseult : Assemblage de l'enceinte hélium et arrivée de son satellite cryogénique

En novembre, les pièces du puzzle de l'aimant du projet Iseult s'assemblent. Le 6 novembre, à Belfort au sein des usines Alstom, a eu lieu l'assemblage délicat de la structure soutenant les aimants de blindage (30 tonnes) autour de l'aimant principal (80 tonnes). Ces deux grosses pièces consituent l'enceinte hélium qui sera alimentée par son satellite cryogénique. Cette dernière pièce a été installée le 16 novembre dans la salle qui hébergera l'aimant à Neurospin. Un ensemble complexe pour assurer un fonctionnement sous champ 24h/24h avec un automate haute fiabilité est dès à présent en cours d'intégration et de test.



Vue de l'aimant avec les bobinages (orange) / la structure froide 1.8 K (bleu)/ le cryostat (violet).

27 NOVEMBRE

Fin d'installation de la station de pré-assemblage des bobines de JT-60SA à Saclay

Lorsque le tokamak JT-60SA sera en fonctionnement, ses 18 bobines supraconductrices subiront des efforts mécaniques qui doivent être repris par des structures de maintien externe. L'assemblage de cette structure sur la bobine sera faite à Saclay. Toute la procédure pour effectuer cet assemblage a été conçue à l'Irfu et l'ensemble de l'outillage vient d'être receptionné au bâtiment 198 du SACM. Chacune des dix-huit bobines produites pour moitié par Alstom et ASG, ainsi que les dix-huit OIS associés fabriqués par SDMS pourront être pré-assemblés dans des conditions de précision, de propreté et de sécurité optimales, conformément au cahier des charges. Sans attendre les premières livraisons de composants (bobine et OIS) fin 2015, les opérations de manutentions sont testées à l'aide d'une maquette de bobine en polystyrène.

Test de fonctionnement de l'outillage de retournement avec la maquette de bobine en polystyrène.

27 NOVEMBRE

Livraison de l'aimant R3B-Glad à GSI

Le dipôle supraconducteur de grande acceptance R3B-Glad est destiné à l'analyse des réactions de faisceaux d'ions lourds radioactifs relativistes et sera installé sur le futur accélérateur Fair (GSI). Il a été conçu à l'Irfu entre 2005 et 2008; les ingénieurs et techniciens de l'institut avaient aussi la responsabilité de tester ses performances à sa température de fonctionnement à 4,5 K. Après plus de 18 mois d'essais, l'aimant a atteint son courant nominal en décembre 2013. En 2014, ce gros papillon de 22 tonnes a été installé dans son habitacle : un cryostat de 37 tonnes. L'ensemble de 59 tonnes a rejoint l'accélérateur de GSI début novembre 2015, pour sa réception en 2016 et ses premières expériences en 2017.

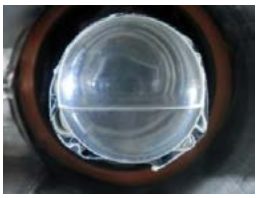
Fin de l'intégration et de test de l'aimant R3BGlad à l'Irfu.

CRYOGÉNIE

2013

20 JUILLET

La cible d'hydrogène de Minos au Japon
La cible d'hydrogène liquide du dispositif Minos a été testée avec succès dans les salles de l'accélérateur de Riken au Japon. Le projet Minos a pour but d'étudier les propriétés des noyaux très exotiques par réaction avec les protons de la cible d'hydrogène. La connaissance des noyaux exotiques est fondamentale pour généraliser et rendre plus prédictifs les modèles microscopiques qui décrivent la structure du noyau.

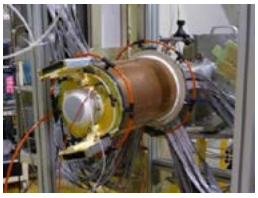


Remplissage de la cible avec de l'hydrogène liquide (vue de face).

2014

1ER SEPTEMBRE

Minos au Japon : validation du trajectographe
Le projet Minos a pour but d'étudier les propriétés des noyaux très exotiques par réaction avec les protons d'une cible d'hydrogène. La connaissance des noyaux exotiques est fondamentale pour généraliser et rendre plus prédictifs les modèles microscopiques qui décrivent la structure du noyau. Après le test réussi de la cible d'hydrogène liquide du dispositif Minos en juin 2013 à Riken au Japon, une autre partie du dispositif de l'expérience, la TPC a également passé les tests avec succès dans les salles de l'accélérateur de Himac au Japon.



La TPC de Minos vue de face, en position à Himac (Japon).

2015

27 JUIN

Un bouclier magnétique pour les futurs vols spatiaux : le projet SR2S
Baptisé Space Radiation Superconducting Shield (SR2S), et financé par l'Union Européenne, ce projet a fait l'objet d'une réunion d'experts au centre CEA de Saclay le 17 juin. Une collaboration européenne, emmenée par l'INFN (Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italie) et impliquant le service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme du CEA/Irfu, étudie les solutions technologiques pour concevoir des aimants supraconducteurs susceptibles d'équiper les futurs vaisseaux spatiaux. Son but est de parvenir à déterminer les pistes existantes et les développements à mener pour fabriquer un « bouclier magnétique » protégeant les astronautes des rayonnements cosmiques lors de voyages spatiaux de longue durée.

À gauche, le chef de projet SR2S à l'Irfu et responsable des workpackages sur la cryogénie et stabilité de l'aimant. À droite, le coordinateur à INFN de la collaboration européenne SR2S.

16 NOVEMBRE

Validation de la station d'essai cryogénique du tokamak JT-60SA
Après avoir reçu le cryostat de JT-60SA en 2012, l'Irfu vient de terminer la validation du process cryogénique avec un aimant test (Démo Coil). Cette étape désormais terminée, les équipes d'ingénieurs vont pouvoir commencer à caractériser les aimants supraconducteurs qui équiperont le tokamak dès reception de la première bobine fin 2015.

Le SACM dans le monde depuis 2013

ESS Lund
XFEL Hambourg
Spiral2 Caen
Commission Européenne Bruxelles
GSI Fair Darmstadt
F4E Garching
CEA Saclay
Cern Genève
LNCMI Grenoble
Iter Cadarache
INFN Frascati
F4E Barcelone
Saraf
Ifmif Rokkasho
JT-60SA Naka
Riken Saitama

Entités et organismes

ALAT	« Air Liquide Advanced Technologies »
BARC	« Bhabha Atomic Research Centre » (Inde)
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CERN	Centre Européen Recherche Nucléaire
CIEMAT	« Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas » (Espagne)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DAM	Direction des Applications Militaires du CEA
DRF	Direction de la Recherche Fondamentale du CEA
DSM	Direction des Sciences de la Matière du CEA
EUCARD2	European Coordination for Accelerator Research and Development
F4E	Fusion For Energy (Organisme européen)
GANIL	Laboratoire de recherche en physique nucléaire à Caen
GSI	Laboratoire de recherche en physique nucléaire à Darmstadt, Allemagne
I2BM	Institut d'Imagerie Biomédicale du CEA
IAEC	« Israel Atomic Energy Commission »
IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS
INFN	« Instituto Nazionale di Fisica Nucleare » (Italie)
IPHC	Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN
IPN	Institut de Physique Nucléaire d'Orsay du CNRS
IRAMIS	Institut Rayonnement Matière de Saclay du CEA/DRF
IRFU	Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers
JLAB	« Thomas Jefferson National Accelerator Facility » (Jefferson Lab)
KEK	Laboratoire japonais de physique des hautes énergies
KHK	« The High Pressure Gas Safety Institute of Japan »
LAL	Laboratoire de l'Accélérateur linéaire d'Orsay
LASA	« Laboratori Acceleratori e Superconduttività Applicata » (Italie)
LCSE	Laboratoire de Cryogénie et Stations d'Essais du SACM
LEAS	Laboratoire d'Etudes des Aimants Supraconducteurs du SACM
LEDA	Laboratoire d'Etudes et de Développements pour Accélérateurs du SACM
LIDC2	Laboratoire d'Intégration et de Développement des Cavités et des Cryomodules du SACM
LISAH	Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Accélérateurs et des Hyperfréquences du SACM
LITEN	Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux du CEA
LLB	Laboratoire Léon Brillouin
LNCMI	Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses du CNRS
LPGP	Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas
LPSC	Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
NCBJ	Centre National pour la Recherche Nucléaire (Pologne)

PSI	« Paul Scherrer Institut » (Allemagne)
QST	« Rokkasho Fusion Institue » (Japon)
RAL	« Rutherford Appleton Laboratory » Royaume-Uni
RIKEN	Institut de Recherche Scientifique Japonais
SACM	Service des Accélérateurs, de Cryogénie et de Magnétisme
SCK-CEN	Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (Belgique)
SEDI	Service d'Électronique des Détecteurs et d'Informatique
SIS	Service d'Ingénierie des Systèmes de l'Irfu
SNRC	« Soreq Nuclear Research Center » (Israël)
SPhN	Service de Physique Nucléaire de l'Irfu
STFC	« Sience & Technology Facilities Council » (Grande Bretagne)

INSTALLATIONS - EXPERIENCES

CARE	« Coordinated Accelerator Research in Europe » Projet de réacteur hybride couplant un accélérateur de protons à un réacteur sous-critique
CONCERT	« COmbined Neutron Center for European Research and Technologie », projet de construction d'un complexe produisant des flux intenses de neutrons pour plusieurs applications (physique des particules, physique nucléaire, neutronique, transmutation de déchets nucléaires)
CTF3	Plateforme d'essais pour Clic au Cern
DEMO	« DEMOnstration Power Plant » – démonstrateur d'usine de production électrique par fusion (2 GW en continu) prévu aux environs de 2030 au Japon
DESY	« Deutsches Elektronen-Synchrotron » Centre de recherche physique des particules, Accélérateurs, et sources de Photon à Hambourg (Allemagne)
ESS	Source Européene de Spallation (Suède)
FAIR	« Facility for Antiproton and Ion Research », projet pour une montée en intensité du complexe d'accélérateurs de GSI (Allemagne)
FRESCA2	« Facility for the REception of Superconducting Cables » (Cern)
IFMIF	« International Fusion Materials Irradiation Facility » – installation permettant le test d'irradiation des matériaux prévus pour la construction du futur Iter
ILC	« International Linear Collider » - projet international de futur collisionneur e+/e- pour la physique des particules, visant 0.5 TeV dans le centre de masse, et appelé à succéder au LHC
IPHI	Injecteur de Protons de Haute Intensité
ITER	« International Thermonuclear Experimental Reactor »
LHC	« Large Hadron Collider » (au Cern à Genève)
MYRRHA	Projet de réacteur hybride couplant un accélérateur de protons à un réacteur sous-critique qui sera installé à Mol (Belgique). La partie « accélérateur » (Projet MAX) est développée par une collaboration Européenne
NEUROSPIN	Centre d'étude du fonctionnement du cerveau par Résonnance Nucléaire Magnétique. Les modifications des moments magnétiques des protons au sein d'un champ magnétique intense sont enregistrées à l'aide d'une antenne RF
R^3B	« Reaction with Relavistic Radioactive Beams of exotic nuclei » (Allemagne)
SARAF	« Soreq Applied Research Accelerator Facility » (Israël)
SILHI	Source d'Ions Légers de Haute Intensité (CEA Saclay)
SIS18	Synchrotron d'Ions Lourds à GSI (Allemagne)
SPIRAL 2	Source d'Ions Légers de Haute Intensité, installation en construction pour produire des flux intenses d'ions rares à des fins de recherche en physique nucléaire au Ganil

SR2S	« Space Radiation Superconducting Shield »
SUPRATECH	Plate-forme de recherches technologiques francilienne sur les cavités accélératrices
XFEL	« X Free Electron Laser », projet européen de laser à électrons libres en cours de finalisation en 2017, et qui a nécessité l'assemblage au SACM de ~800 cavités 9-cellules 1.3 GHz dans une centaine de cryo-modules de 12 m de long. En cours d'installation à Desy (Allemagne)

ACRONYMES TECHNIQUES

3D	Représentation volumique en 3 dimensions
ACCT	« Alternative-Current Current Transformer » (mesure de courant non interceptive)
AFM	« Atomic Force Microscopy »
ALD	« Atomic Layer Deposition », technique permettant de déposer des films, couches atomiques par couches atomiques à l'aide de divers précurseurs chimiques. Ces films sont homogènes et épousent parfaitement les surfaces, même les plus complexes
BCP	« buffered chemical polishing », technique de polissage chimique du niobium
BPM	« Beam Position Monitor » (Moniteur de position de Faisceau)
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CH	« Cross-bar-H-mode » Cavité RF en mode H, adaptée aux ions lourds de faible vélocité
CIC	Compression Isostatique à chaud
EBSP	« Electron BackScattering Pattern ou diagrammes » de Kikuchi, diagramme de diffraction dépendant de l'orientation cristalline, qui permettent également de quantifier le degré de désorientation dû aux défauts cristallins. Plus récemment appelé « Orientation imaging »
ECR	« Electron Cyclotron Resonance »
EDX	« Energy Dispersive Xray analysis » méthode d'analyse élémentaire par fluorescence X des atomes, couramment installée sur les microscopes électroniques
HOM	« High order modes », harmoniques supérieures des modes de résonance d'une cavité
HPR	Rinçage Haute Pression
HTc & SHTc	Supraconducteur à Haute Température critique (au-dessus de 50 Kelvins)
HWR	« Half Wave Resonator »
IR	Spectrométrie Infra Rouge
LBE & LTBE	Ligne (très) Basse Energie (pour faisceaux dans le cadre des accélérateurs)
LINAC	Accélérateur de type linéaire
MBE	« Molecular beam Epitaxy » L'épitaxie par jets moléculaires est une technique consistant à envoyer un ou plusieurs jets moléculaires vers un substrat préalablement choisi pour réaliser une croissance épitaxiale, c'est-à-dire en conservant un certain nombre d'éléments de symétrie communs entre les deux réseaux cristallins
PIXE	Proton Induced X-ray Emission
QWR	« Quater Wave Resonator »
R&D	Recherche et Développement
RF	« radiofréquences », fréquences comprises entre quelques dizaines de MHz et quelques GHz
RFQ	Quadripôle RadioFréquence
RRR	« Residual Resistivity Ratio », ou rapport de résistivité résiduelle.
SDL	Spectroscopie de Décharge Luminescente. Méthode d'analyse élémentaire (profils)
SIMS	« Secondary Ion Mass Spectroscopy » Méthode d'analyse élémentaire
SPL	« Super Proton Linac » accélérateur en projet au Cern pour la production de flux intenses de neutrinos. supraconductivité radiofréquence, domaine des applications radiofréquences de la supraconductivité, principalement les cavités et les systèmes pour accélérateurs

Notes

Les publications

2013 2014 2015

Directeur de publication : Pierre Védrine
Coordinateurs : Bertrand Hervieu, Roser Vallcorba.
Design graphique : idées fraîches®

Comité de rédaction : Claire Antoine, Bertrand Baudouy, Philippe Bredy, Antoine Daël, Bertrand Hervieu, Thomas Proslier, Roser Vallcorba.

Contributeurs principaux : Walid Abdel Maksoud, Claire Antoine, Elodie Banizette, Bertrand Baudouy, Christophe Berriaud, Pierre Bosland, Didier Braud, Philippe Bredy, Romain Bruce, Antoine Chancé, Nicolas Chauvin, Stéphane Chel, Christelle Cloué, Antoine Daël, Fabien Eozenou, Denis De Ménèzes, Michel De Sousa, Olivier Delferrière, Maria Durante, Philippe Fazilleau, Hélène Felice, Hernan Furci, Laurent Genini, Jean-Marc Gheller, Raphaël Gobin, Bertrand Hervieu, François-Paul Juster, Olivier Kuster, Michel Luong, Catherine Madec, Claude Marchand, Christophe Mayri, Alban Mosnier, Olivier Napoly, Alain Payn, Nicolas Pichoff, Olivier Piquet, Juliette Plouin, Christine Porcheray, Bruno Pottin, Lionel Quettier, Florence Ragon, Jean-Michel Rey, Jean-Michel Rifflet, Françoise Rondeaux, Thierry Schild, Jérôme Schwindling, Angèle Sene, Franck Senée, Claire Simon, Olivier Tuske, Didier Uriot, Thierry Vacher, Roser Vallcorba, Pierre Védrine.

http://irfu.cea.fr/Sacm/
Images : © CEA Irfu, Jean Larive, Alstom, Cern, EUROFusion, GSI et d'autres.
Tous droits réservés. Toute reproduction non autorisée est interdite.

Irfu
Institut de recherche
sur les lois fondamentales
de l'Univers

DSM/Irfu/SACM - CEA - Saclay
Bât 123 - F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex
FRANCE

http://irfu.cea.fr/Sacm/