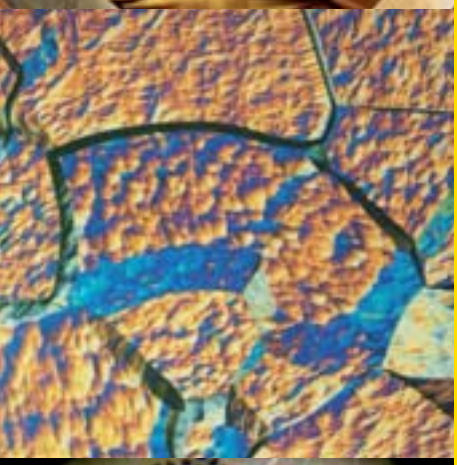
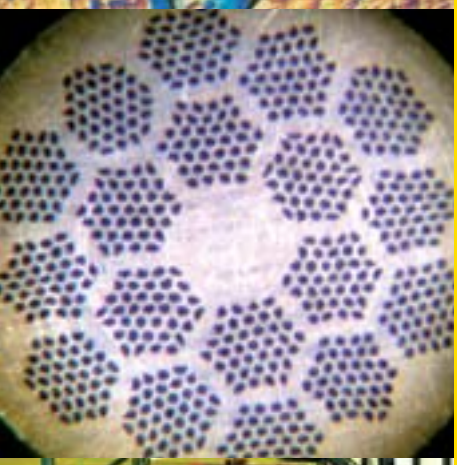




Direction des sciences de la matière

Département d'astrophysique, de physique des particules,
de physique nucléaire et de l'instrumentation associée

Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

SACM 2004-2006

Sommaire

Préface

Les laboratoires

Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité

L'injecteur de protons à haute intensité Iphi 5
Le complexe accélérateur d'Ifmif 7
Le projet Spiral 2 8

Collisionneurs d'électrons-positons et sources de lumière

Cryomodules pour machines à rayonnement synchrotron 11
Les projets de collisionneur ILC et de sources de lumière XFEL supraconducteurs 12
L'accélérateur Califes de CTF3 14

Développements pour les accélérateurs de particules

Développement de sources d'ions 16
Développements de structures accélératrices supraconductrices 17
R&D en supraconductivité radiofréquence 19
Dynamique des faisceaux de particules 21
Développements d'une source de positons 23

Électroaimants supraconducteurs

Les quadripôles supraconducteurs pour le LHC 25
L'aimant toroïdal pour le détecteur Atlas 27
Le solénoïde supraconducteur pour le détecteur CMS 30
Le solénoïde Clas pour l'expérience DVCS 33
Le dipôle supraconducteur R3B-Glad 34
Le solénoïde pour l'expérience Compass 36
Les tests des bobines du stellarator Wendelstein 7-X 37
Le projet Iseult pour la plate-forme Neurospin 38
Contribution au projet Iter 40

Cryogénie

Cryogénie alternative pour les températures au-dessus de celle de l'hélium liquide 42
Le cryostat de l'imageur Mirim 43
La cible à hydrogène Spaladin 44
Circulation naturelle d'hélium diphasique 45

Développements pour les aimants du futur

Quadripôle modèle en niobium-étain 47
Développement d'une isolation en céramique pour les câbles supraconducteurs 48
Transfert de chaleur en hélium superfluide à travers des milieux poreux 48
Utilisation des supraconducteurs à haute température critique 49

Les plateformes techniques

Le service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

La mission du SACM est de développer et réaliser des accélérateurs de particules, des systèmes cryogéniques et des aimants supraconducteurs destinés aux programmes scientifiques du Dapnia et plus largement du CEA. Le SACM a pour vocation d'assurer la conduite de projets de grande envergure. Ces projets se réalisent dans le cadre de la structure projet du Dapnia et associent les compétences des autres services du Département, tant de physique que de technologie, en particulier du Service d'ingénierie des systèmes.

Le SACM regroupe, en décembre 2006, 67 ingénieurs et 51 techniciens. Il accueille également plusieurs doctorants, quelques visiteurs et de nombreux stagiaires ou étudiants en formation alternée. Le personnel est réparti dans quatre laboratoires :

- le Laboratoire d'études et de développement pour les accélérateurs (Léda),
- le Laboratoire d'études des structures accélératrices et des radiofréquences (Lésar),
- le Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs (Léas),
- le Laboratoire cryogénie et stations d'essais (LCSE).

Un Conseil scientifique et technique de service, le CSTS, composé de 16 membres dont 5 experts internationaux extérieurs au CEA, se réunit une fois par an pour dresser un bilan des activités en cours et analyser les nouvelles propositions. Le CSTS aide le chef du SACM à élaborer la stratégie de recherche et de développement du service. En particulier les orientations choisies dans le cadre des programmes européens sont examinées par le CSTS.

Pour atteindre ses objectifs, le SACM dispose d'installations techniques variées :

- des laboratoires spécifiques pour les essais électriques, cryogéniques, mécaniques, radiofréquences, les caractérisations de matériaux, les traitements chimiques de surfaces ;
- des stations d'essais, à 4 K et 1,8 K, pour les tests d'éléments supraconducteurs ou d'électroaimants jusqu'à 20 000 A, de cavités accélératrices supraconductrices équipées de leurs coupleurs de puissance, avec les moyens d'acquisition et d'analyse nécessaires ;
- un liquéfacteur pour la production d'hélium liquide et trois réfrigérateurs associés aux stations d'essais.

Le SACM a participé au cours des trois dernières années de façon très importante à la construction du *Large hadron collider* du Cern. Ces années ont été jalonnées de succès avec la livraison des 360 masses froides des quadripôles de l'anneau accélérateur, l'essai en surface du solénoïde de CMS, la fin de l'assemblage et le test en caverne du toroïde Atlas. En continuité avec ces grands projets les compétences de cryogénie et de magnétisme ont été redéployées et ont permis le lancement de projets, innovants qui sont de véritables défis scientifiques et techniques tels l'aimant Neurospin-Iseult et le spectromètre R3B-Glad.

Le SACM a maintenu au plus haut niveau son implication dans le développement de cavités supraconductrices à la fois dans le cadre de la collaboration internationale Tesla et dans le cadre du 6e PCRD. Une valeur très élevée du champ accélérateur (43 MV/m) a été obtenue en 2006 grâce à un dispositif nouveau d'électro-polissage. Par ailleurs le SACM a consolidé sa maîtrise des sources ECR à protons en délivrant couramment des intensités de 100 mA en continu et a progressé de façon décisive dans la réalisation de l'injecteur Iphi et de ses cavités accélératrices RFQ.

Dans les trois années qui viennent les efforts porteront d'abord sur l'achèvement de l'injecteur Iphi, la mise en service de l'expérience Sophi, la construction de l'injecteur de Spiral2, le lancement des équipements du prototype Ifmif-Eveda et la réalisation, suivie du test, des cryomodules de Spiral2. L'infrastructure nécessaire à ces nombreux programmes sera établie grâce au parachèvement du rapprochement géographique des équipes, à la construction de la nouvelle salle blanche et de l'installation de chimie associée et à la mise à niveau opérationnelle de la plateforme Accélérateurs de Saclay.

Dans le domaine du cryomagnétisme le programme de test des bobines W7X sera complété à l'horizon 2009 et ouvrira des prolongements technologiques vers le programme Iter. Le spectromètre R3B-Glad sera assemblé et testé, les cartographies magnétiques valideront son utilisation pour la physique nucléaire. Le programme de développement de l'aimant d'imagerie médicale Neurospin-Iseult connaîtra ses phases les plus critiques en vue d'obtenir les ambitieuses performances de champ magnétique, d'homogénéité et de stabilité.

D'ici 2010 et dans ses activités complémentaires d'accélérateurs et de cryomagnétisme le SACM va vivre des heures très riches à la hauteur des ambitions scientifiques européennes du CEA Saclay et des communautés qui l'entourent.

Antoine Daël, chef du SACM

LEDA

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

Constitué, en décembre 2006, de 14 ingénieurs, 7 techniciens et 2 étudiants en thèse, le Léda comprend spécifiquement :

- une équipe d'experts en dynamique 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, magnétiques et radiofréquence ;
- une équipe d'expérimentateurs spécialistes dans le fonctionnement de sources et d'injecteurs, et dans la mesure des paramètres du faisceau impliquant la réalisation et la mise en oeuvre de diagnostics ;
- un laboratoire de vide et d'ultravide compétent dans le calcul du vide des accélérateurs et les techniques de traitement thermique et de mesure de désorption des matériaux ;
- une équipe technique maîtrisant les aspects d'installation, de montage mécanique et de refroidissement d'accélérateurs.

Les faits marquants de ces dernières années ont été le démarrage de la construction de l'accélérateur de deutons Spiral 2, faisant suite à la réussite des réalisations de l'avant-projet, celui de l'injecteur d'électrons Califes pour le projet CTF3 au Cern, ainsi que la mise en place graduelle du démonstrateur de faisabilité d'un injecteur de protons de haute intensité, Iphi, en particulier de son quadripôle radiofréquence.

Pour préparer l'avenir, le Léda est engagé dans la construction d'accélérateurs linéaires de haute intensité pour l'énergie nucléaire (Ifmif), et dans l'exploration des bases théoriques et des techniques de la prochaine génération d'accélérateurs de particules tels que les collisionneurs linéaires e+e- et les usines à neutrinos.

Contact : olivier.napoly@cea.fr

LESAR

Le **Laboratoire d'études des structures accélératrices et des radiofréquences** (Lésar) est chargé du développement des structures radiofréquences (RF) ainsi que des composants associés nécessaires pour l'accélération des faisceaux de particules. Une partie importante de l'activité concerne la technologie des cavités supraconductrices utilisées pour différents types d'accélérateurs (à ions, à électrons, à protons), avec le but d'améliorer sans cesse leurs performances et de stabiliser leur fonctionnement.

Les compétences spécifiques développées par les 19 ingénieurs et les 11 techniciens de ce laboratoire se décomposent en deux thèmes :

- L'étude de structures accélératrices depuis la conception à l'aide de logiciels de simulation RF jusqu'aux tests de prototypes. Cette activité inclut le réglage des cavités et des composants RF, la conception de l'électronique et de la régulation RF ainsi que des tests avec faisceau de prototypes. Au cours de l'année 2006, l'ensemble des cryostats d'essais de cavités supraconductrices, en particulier Cryholab qui permet des essais dans un environnement du type accélérateur, et les équipements de cryogénie associés ont été regroupés et remis à niveau dans la nouvelle zone SupraTech-Cryo/HF.
- L'étude du comportement des cavités supraconductrices en fonction des traitements de surface, accompagnée de mesures sur les matériaux supraconducteurs. Pour cela le laboratoire bénéficie de plusieurs équipements remarquables : un laboratoire de chimie, une salle blanche de classe 10 avec un rinçage à haute pression, un banc de dépôt PVD (physical vapor deposition).

Les principaux faits marquants du laboratoire au cours des trois dernières années sont :

- la participation à la réalisation, aux essais et à la mise en œuvre du premier cryomodule de l'anneau de rayonnement synchrotron Soleil,
- l'étude de cryomodules pour l'accélérateur Spiral 2, avec les essais d'une cavité quart-d'onde prototype,
- le développement d'un système d'accord en fréquence intégrant des barreaux piézoélectriques optimisés pour la compensation des forces de pression de radiation,
- le développement d'un banc d'électropolissage pour cavités monocellulaires,
- l'installation d'une source pulsée de 1 MW fonctionnant à 700 MHz,
- l'étude et le développement d'une antenne à haute fréquence utilisable pour un appareil d'IRM à 7 T,
- la mise au point d'un procédé d'étuvage en salle blanche de cavités supraconductrices permettant d'améliorer les performances à haut gradient accélérateur.

Contact : stephane.chel@cea.fr

LEAS

Chargé de répondre aux besoins des physiciens du Dapnia dans le domaine des champs magnétiques, le **Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs** (Léas) est constitué, en décembre 2006, de 10 techniciens et 19 ingénieurs. Les équipes du laboratoire assurent la conception et la maîtrise d'oeuvre 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 la protection des aimants en cas de transition. Outre la conception des aimants, le Léas est aussi en mesure d'assurer le management de grands projets, de prendre en charge la réalisation des aimants et leur intégration dans leur cryostat et d'assurer le suivi des réalisations industrielles. Le contrôle des aimants est assuré en collaboration avec le Laboratoire cryogénie et station d'essais. Les mesures nécessaires couvrent les analyses des essais à température ambiante et cryogénique avec, entre autres, les analyses de *quench* et les mesures magnétiques.

Ces dernières années ont été marquées par la fin des activités liées à la réalisation de l'accélérateur LHC (*Large hadron collider*) du Cern avec une importante participation, à Saclay, au Cern et dans l'industrie européenne : intégration et tests en caverne réussis du toroïde Atlas, assemblage et tests en surface concluants du solénoïde CMS et fin de la production dans l'industrie des masses froides des quadripôles principaux de la machine. L'activité liée aux tests des bobines pour le stellarator W7-X se poursuit alors que de nouveaux projets ont démarré : dipôle du spectromètre R3B et solénoïde de l'imageur Iseult.

Pour rester compétitif, le Léas s'est défini plusieurs axes de progrès. Pour cela il maintient et améliore ses outils de conception (moyens de calcul, entre autres) et supporte un programme de R&D visant à l'obtention de champs magnétiques élevés. Cette R&D concerne l'utilisation du niobium-étain et l'utilisation des supraconducteurs à haute température critique. Toutes ces activités conduisent le Léas à maintenir ou établir de nombreux contacts avec d'autres laboratoires européens ou mondiaux et, bien sûr, avec les autres laboratoires du SACM, du Dapnia et du CEA.

Contact : jean-michel.rifflet@cea.fr

LCSE

La mission du **Laboratoire cryogénie et station d'essais** (LCSE) 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 ainsi que la distribution d'azote liquide.

Cette maîtrise s'exerce dans la capacité de concevoir, construire et faire fonctionner diverses installations cryogéniques de taille et de nature très variées. Les fluides mis en œuvre sont l'hélium à ébullition ou supercritique, l'hélium superfluide, l'azote liquide, l'argon liquide ou l'hydrogène liquide. Les machines de production de froid vont du cryogénérateur au réfrigérateur à turbines incluant l'emploi de circulateurs ou de boucles de circulation en thermosiphon.

La conception, la réalisation, l'intégration et la mise au point concernent les cryostats et la cryodistribution associée. Les utilisateurs traditionnels sont les physiciens des particules élémentaires et les physiciens nucléaires utilisant des accélérateurs (Cern, GSI, Hera, TJNAF, Ganil). Les autres utilisateurs sont issus de la communauté médicale (projet d'imagerie cérébrale NeuroSpin), de la communauté de la fusion (Iter) et aussi les stations d'essais et de caractérisation du laboratoire.

Ces stations d'essais et de caractérisation constituent un ensemble très complet de 15 équipements principaux, permettant de déterminer les propriétés mécaniques, thermiques et électriques aux températures cryogéniques et sous champ magnétique de divers matériaux (isolants, composites, alliages métalliques et supraconducteurs) et de tester des aimants et des cavités ainsi que leurs composants.

Le développement de l'expertise du laboratoire est assuré par la R&D sur les écoulements diphasiques d'hélium, la thermohydraulique des thermosiphons et les transferts thermiques dans l'hélium superfluide et les milieux poreux.

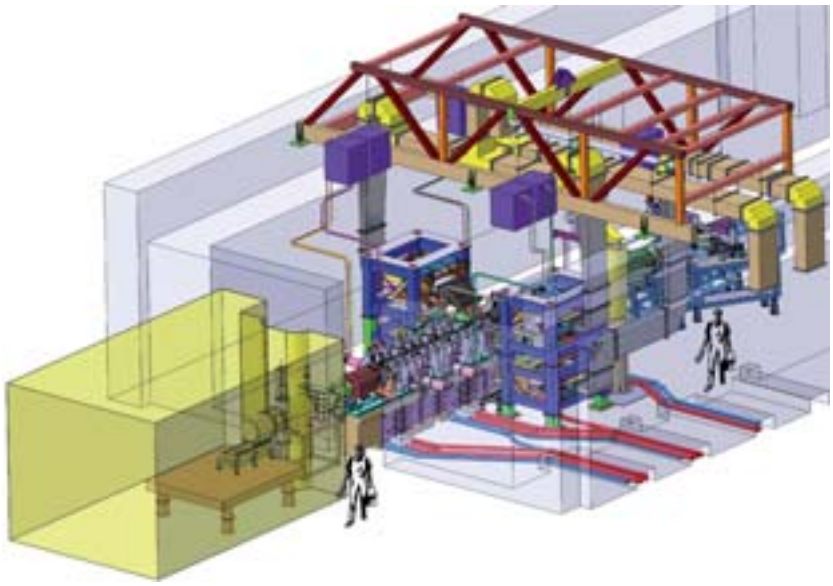
L'effectif du laboratoire est, en décembre 2006, de 13 ingénieurs, 15 techniciens et 2 thésards.

Contact : philippe.chesny@cea.fr

Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité

L'injecteur de protons à haute intensité Iphi

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



Représentation 3-D de l'accélérateur Iphi, depuis la source Silhi en bas à gauche, jusqu'au bloc d'arrêt en haut à droite, en passant par les cavités accélératrices radiofréquence et la ligne de diagnostics du faisceau. Les parties en gris représentent les protections biologiques en béton.

Iphi est un prototype d'injecteur de protons accélérant jusqu'à 3 MeV un faisceau de 100 mA continu. Il se compose principalement d'une source de protons et de son transport de faisceau à basse énergie (95 keV), d'une cavité accélératrice de type RFQ (*Radio frequency quadrupole*) portant l'énergie à 3 MeV et d'une ligne de diagnostics destinée à mesurer avec la plus grande précision possible les caractéristiques essentielles du faisceau en sortie du RFQ. Parallèlement, un prototype de cavité DTL (*Drift tube linac*) - cavité la mieux adaptée pour accélérer le faisceau issu du RFQ – a été développé et testé avec succès au Cern en 2002.

Fabrication de la cavité accélératrice de type RFQ

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

La cavité est constituée de six éléments – les tronçons – d'environ un mètre chacun. Chaque tronçon unique est usiné en quatre parties appelées électrodes. Le profil modulé de ces électrodes doit être réalisé avec une précision de ± 20 micromètres. Des canaux de refroidissement sont percés longitudinalement sur un mètre avec une précision de positionnement de ± 0,2 mm.

Le matériau choisi est un cuivre ultra pur exempt d'oxygène, forgé à chaud en trois dimensions puis stabilisé par un cycle thermique. Après la phase d'ébauchage, chaque électrode subit un nouveau cycle thermique sous vide à 600°C destiné à relâcher les

Vue du 1er tronçon de quadripôle accélérateur radiofréquence installé sur la poutre support.

Vue du tronçon n° 2 de quadripôle radiofréquence entrant dans le four de brasage du Cern.

contraintes mécaniques causées par l'outil de fraisage. Ces traitements ont pour conséquence de donner un matériau extrêmement ductile et donc très délicat à usiner. À l'issue de l'usinage de finition, les quatre électrodes sont assemblées par un premier brasage à 800°C dans un four sous vide. Une deuxième opération de brasage permet de rapporter l'ensemble des appendices nécessaires au fonctionnement.

Après la réalisation d'un prototype de validation fonctionnel, la fabrication des tronçons de série a débuté en 2004 et se terminera en 2007. L'usinage a été confié à la société Mécachrome et l'assemblage est assuré par l'atelier de brasage du Cern.

Réglage radiofréquence du RFQ

Pour accélérer le faisceau de façon nominale, la cavité RFQ doit aussi être réglée du point de vue radiofréquence avec une très grande précision. Ce réglage est obtenu par l'insertion dans la cavité de 96 cylindres en cuivre appelés pistons dont les cotes doivent être ajustées individuellement pour respecter la loi de champ électrique calculée. Un tel réglage ne peut en aucun cas être réalisé de manière empirique. Une maquette en aluminium à l'échelle 1 de la cavité a été réalisée pour permettre d'étudier et de mettre au point les procédés de réglage. En 2006, ces procédés ont été validés sur cette maquette qui a pu être ajustée avec la précision requise. Les procédés seront appliqués en 2007 à la cavité en cuivre après assemblage et alignement des six tronçons sur son support.

Installation à Saclay

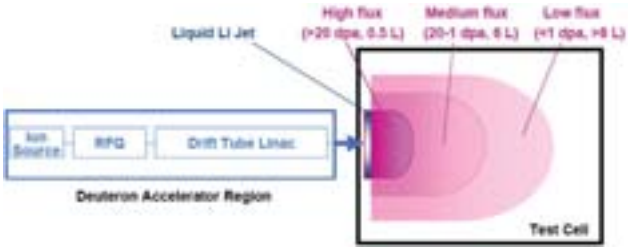
L'installation d'Iphi à Saclay dans les halls libérés de l'accélérateur Saturne a débuté en 2003 par l'assemblage de la source de protons et des protections biologiques ; elle sera terminée en 2007. Les essais du système de refroidissement et du générateur RF de puissance sont prévus au premier trimestre 2007. L'activité critique de l'année 2007 se concentrera sur le brasage des tronçons de RFQ réalisé au Cern, sur l'assemblage et le réglage radiofréquence de la cavité.

Les essais à Saclay se dérouleront en trois phases sur environ une année. Une période de huit mois environ sera consacrée au démarrage et à la montée en puissance jusqu'à atteindre les performances nominales de Iphi. Deux à trois mois seront ensuite réservés à des essais de fiabilité à intensité réduite dans le cadre du programme européen Eurotrans. Une troisième période verra l'installation et le test d'un dispositif de découpage rapide du faisceau appelé *chopper* développé par le Cern. À l'issue de ces essais prévus en 2007 – 2008, une partie de Iphi sera démontée, transférée au Cern et à terme intégrée à l'injecteur du Linac 4 / SPL (*Superconducting proton linac*).

Vue d'ensemble de la ligne de diagnostics en cours d'assemblage. De gauche à droite : un triplet de quadripôles, un dipôle permettant de guider les particules suivant leur énergie, et deux quadripôles en fin de ligne.

Le complexe accélérateur d'Ifmif

L'année 2006 a vu le lancement officiel du projet de réacteur expérimental de fusion contrôlée Iter et la décision de sa construction en France sur le site du CEA de Cadarache. Iter s'inscrit dans un grand programme de recherche et développement visant à construire et exploiter une unité de production d'électricité à l'horizon 2050. Une étape intermédiaire de ce programme est prévue avec la construction et le test d'un démonstrateur nommé Démo à l'horizon 2040. Les réacteurs de fusion utilisent l'énergie provenant des neutrons produits par la réaction de fusion. Le flux de neutrons prévu dans Démo sera si intense que chaque atome des matériaux de structure du réacteur verra durant sa vie plusieurs dizaines de déplacements. De tels flux semblent incompatibles, du point de vue de la résistance mécanique, avec les matériaux actuellement utilisés. Dès lors, il est indispensable de développer, tester et valider de nouveaux alliages capables de résister à ces flux tout en conservant des qualités suffisantes. C'est le but du complexe accélérateur Ifmif (*International fusion material irradiation facility*) en projet actuellement.



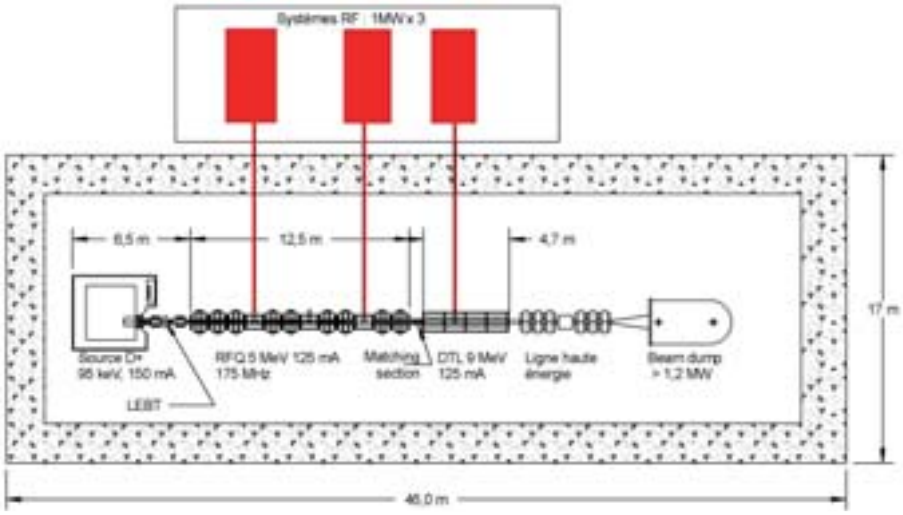
Représentation synoptique de la station Ifmif destiné aux tests d'irradiation de matériaux.

Ifmif est une énorme station de test dont l'objectif est de produire, par l'interaction d'un faisceau intense de deutons avec une cible de lithium, un flux de neutrons de 14 MeV capable de provoquer plus de vingt déplacements par atome et par an dans un échantillon de 1/2 litre. Le faisceau intense de deutons nécessaire (250 mA de D^+ à 40 MeV) sera produit par deux accélérateurs linéaires travaillant en parallèle. De tels accélérateurs n'ont encore jamais été construits.

Une phase de prototypage appelée Eveda (*Engineering validation and engineering design activity*) est nécessaire préalablement à la construction de Ifmif. Durant cette phase, un accélérateur constitué d'une source de deutons de 125 mA, d'une cavité accélératrice de type RFQ (*Radio frequency quadrupole*), d'un linac à tubes de glissement (DTL pour *Drift tube linac*) et d'un bloc d'arrêt sera construit, assemblé et testé.

Le partage des responsabilités entre l'Europe et le Japon concernant Eveda a été décidé en 2006 durant les négociations dites d'approche élargie d'Iter. Le programme Ifmif-Eveda s'étalera sur six ans. La fabrication des sous systèmes de l'accélérateur est partagée entre l'Italie, l'Espagne et la France. Le système sera assemblé et testé au Japon sur le site de Rokasho.

Pour la France, le Dapnia et les équipes du SACM ont la charge de la coordination du groupe "accélérateur" avec l'implantation de l'équipe internationale à Saclay, et la construction de plusieurs sous systèmes dont en particulier l'injecteur et le DTL.



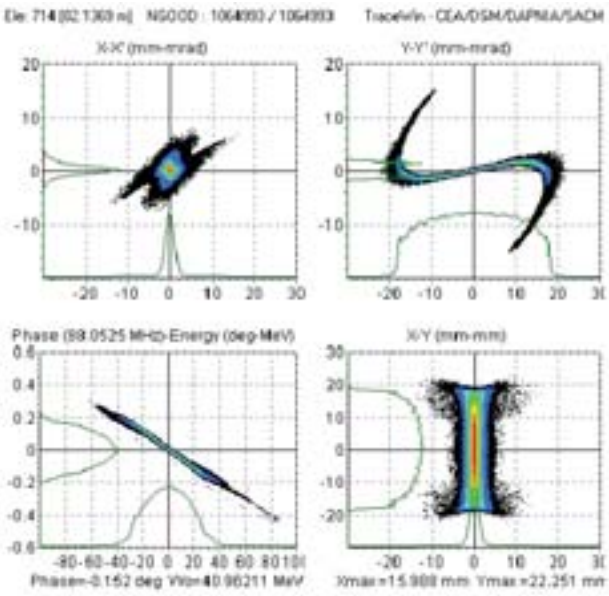
Synoptique du prototype Eveda qui sera installé sur le site japonais de Rokasho.

Le projet Spiral 2

Le projet Spiral 2 a pour but de produire des faisceaux d'isotopes rares de très hautes intensités en adoptant la meilleure méthode de production pour chaque faisceau radioactif. Les faisceaux instables seront produits par la technique Isol (*Isotope separation on-line*) via un convertisseur de carbure d'uranium ou par irradiation directe de matière fissile. La combinaison de toutes ces techniques permettra de couvrir de larges zones de noyaux situés loin de la vallée de stabilité. Au delà de sa fonction première d'outil de recherche pour la physique nucléaire fondamentale, l'installation Spiral 2 pourrait également offrir un instrument multidisciplinaire de hautes performances tout spécialement dans le domaine des sciences nécessitant des flux très intenses de neutrons comme les sciences des matériaux, la physique atomique, la physique du solide et celle des plasmas.

Les spécifications pour l'accélérateur primaire résultant des besoins des expérimentateurs sont les suivantes.

- L'accélérateur primaire doit fournir des faisceaux de deutons et de protons de 5 mA et d'ions lourds avec un rapport de la charge électrique sur la masse (q/A) de 1/3 pour une intensité allant jusqu'à 1 mA.
- La machine doit permettre l'évolutivité pour l'accélération d'ions lourds de q/A de 1/6.
- L'énergie de chaque faisceau devra être ajustable de 750 keV/n (kilo électron-volts par nucléon) à 33 MeV/n pour les protons, 20 MeV/n pour les deutons, 14,5 MeV/n pour les ions lourds de rapport q/A de 1/3 et 9 MeV/n pour les ions lourds de rapport q/A de 1/6.
- Un hacheur rapide permettra de sélectionner la structure du faisceau (de 1 paquet sur 100 à 1 paquet sur 10000).



Simulation du faisceau de deutons dans l'espace des phases au niveau de la cible de carbure d'uranium.

Cavité supraconductrice quart d'onde dans son enceinte à hélium.

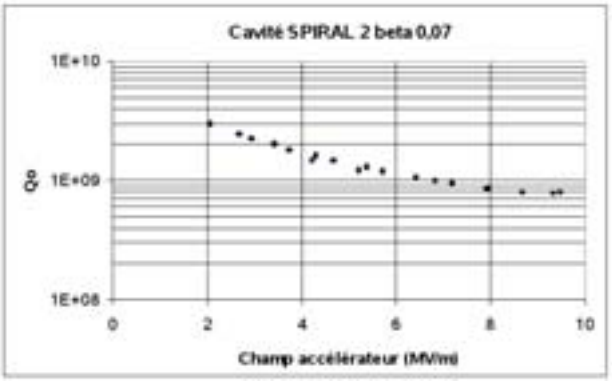
Pendant la phase d'avant-projet sommaire, le Ganil a consulté le SACM pour une expertise portant sur la faisabilité de l'accélérateur primaire. Cette phase s'est concrétisée par le lancement en 2003 d'un avant-projet détaillé (APD) de 2 ans financé par le CEA, le CNRS et la région Basse Normandie. Lors de cette phase, la direction du projet a été confiée à un membre du SACM. Le service a également assuré :

- la direction des études de conception de la machine,
- la construction d'un prototype d'une cavité quart d'onde optimale pour l'accélération d'ions de vitesse égale à 0,07 fois la vitesse de la lumière dans le vide, testée avec succès,
- la construction d'une source de deutons répondant aux spécifications de l'accélérateur,

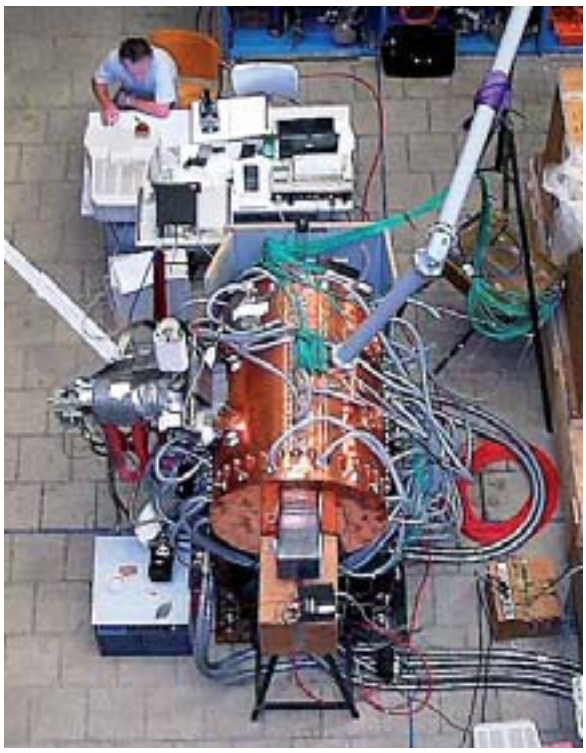
- la conception de la cavité RFQ (*Radiofrequency quadrupole*) et la réalisation d'un prototype de 1 m testé jusqu'à la puissance nominale de 40 kW,
- une expertise sur la faisabilité de solénoïdes supraconducteurs.

L'équipe de l'avant-projet était composée de personnes appartenant à 8 laboratoires, ce qui représentait le travail de 60 personnes. Ce travail a abouti à la définition de l'architecture détaillée de l'accélérateur primaire ainsi qu'au démarrage de l'étude des lignes secondaires.

À l'issue de l'APD, une phase de transition a été mise en place afin d'achever ou de poursuivre plusieurs actions en cours comme la validation du système de refroidissement et de vide du RFQ à l'aide de nouveaux tests ou bien l'étude des cryomodules pour les cavités supraconductrices ou encore la consolidation de l'architecture de la ligne de tri des ions à basse énergie.

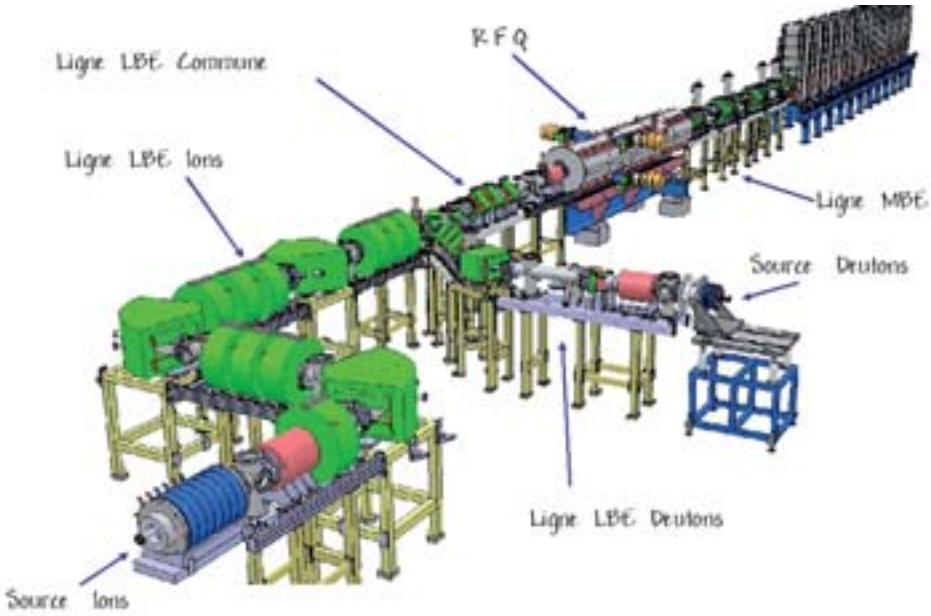


Évolution du facteur de qualité de la cavité supraconductrice prototype quart d'onde en fonction du champ accélérateur.



Test en puissance de la cavité accélératrice prototype de type RFQ.

En 2005, le projet est entré en phase de réalisation. L'effort du SACM se poursuit aussi bien par une participation forte dans la réalisation du RFQ que par la fourniture de 12 cryostats équipés chacun d'une cavité supraconductrice munie de son système d'accord et d'une source de 5 mA de protons et deutons. Le service assure également la responsabilité scientifique dans la coordination du lot injecteur et une expertise en dynamique de faisceau.



Architecture de l'accélérateur primaire.
MBE : mean beam energy
LBE : low beam energy
RFQ : radiofrequency quadrupole

Collisionneurs linéaires d'électrons-positons et sources de lumière

Cryomodules pour machines à rayonnement synchrotron

L'activité du SACM pour les machines à rayonnement synchrotron concerne les deux cryomodules accélérateurs de Soleil, dont la fréquence des cavités est 352 MHz, et les deux cryomodules Super-3HC (*Third harmonic superconducting passive cavities*) dont les cavités fonctionnent à 1,5 GHz. Les cavités Soleil, munies de coupleurs de puissance, servent à accélérer le faisceau circulant dans l'anneau de stockage pour compenser l'énergie perdue à chaque tour sous forme de rayonnement synchrotron. Les cavités Super-3HC sont passives, et c'est le faisceau d'électrons lui-même qui leur fournit l'énergie électromagnétique leur permettant en retour de supprimer certaines instabilités du faisceau, et d'allonger les paquets d'électrons afin d'augmenter la durée de vie du faisceau. La technologie de ces deux types de cryomodules est basée sur une structure radiofréquence (RF) imaginée par Alban Mosnier en 1992 pour les machines à très fort courant d'électrons, usines à B ou machines à rayonnement synchrotron.

Cryomodules Soleil

Un cryomodule prototype a été réalisé en 1999 pendant la phase d'avant-projet détaillé (APD) de Soleil en collaboration avec le Cern. En 2004, des modifications ont été effectuées par le SACM, en collaboration avec Soleil et le Cern, pour que ce prototype devienne opérationnel sur l'anneau de Soleil : démontage complet du cryomodule, nettoyage et tests des cavités supraconductrices en cryostat vertical pour vérifier que leurs performances n'avaient pas été dégradées par toutes les opérations effectuées en phase APD, remontage complet du cryomodule et tests de validation en puissance RF dans le bunker du Cern.

Les tests qui ont eu lieu début 2005 ont validé la remise à niveau du cryomodule prototype pour son fonctionnement sur l'anneau de Soleil : diminution de la consommation cryogénique statique (50 W) et meilleure stabilité thermique de l'ensemble, très bonne réjection du mode fondamental par les coupleurs de modes supérieurs dipolaires, champ accélérateur dans les cavités (E_{max} > 11 MV/m), et puissance maximale supportée par les coupleurs RF (180 kW en mode réfléchi). Après ces tests de validation le cryomodule a été installé sur l'anneau de Soleil en décembre 2005. Il a ensuite attendu le mois de mai 2006 pour son refroidissement à 4 K, puis le mois de juin pour la première accélération du faisceau dans l'anneau de stockage. Pendant la phase de mise en service qui a suivi, le courant a pu être rapidement augmenté jusqu'à sa valeur maximale de 300 mA garantissant le fonctionnement nominal.

Pour le deuxième cryomodule qui sera identique au premier, Soleil est le maître d'œuvre et sa réalisation a été confiée à l'industriel allemand Accel. La commande a été signée en octobre 2005, pour une livraison prévue mi 2007. Le rôle du SACM se limite à quelques prestations et expertises particulières.

Assemblage des coupleurs HOM (high order modes) sur les cavités Soleil dans la salle blanche du Cern.

Cryomodules Super-3HC

Depuis leur installation en 2002 sur les anneaux de SLS (*Swiss light source* de l'institut Paul Sherrer) et d'Elettra (à Trieste en Italie), les deux cryomodules Super-3HC fonctionnent régulièrement. Ils sont même devenus un élément clé du fonctionnement des machines, en particulier pour Elettra. Quelques interventions de maintenance sont régulièrement effectuées, tous les 18 mois environ, pour le remplacement des réducteurs des systèmes d'accord fortement sollicités sur Elettra, contrairement à ceux de SLS qui peuvent rester immobiles.

Une demande de transfert industriel de ce cryomodule a été faite par la société Accel. D'autres laboratoires ont en effet montré leur intérêt pour ce cryomodule en vue d'éventuelles installations sur leurs anneaux de rayonnement synchrotron.

Les projets de collisionneur ILC et de source de lumière XFEL supraconducteurs

L'ILC (*International linear accelerator*) est un projet de collisionneur linéaire à électrons-positons pour la physique des particules visant des énergies de l'ordre du tera-électronvolt. La technologie d'accélération radiofréquence supraconductrice à hauts gradients accélérateurs (25 MV/m et plus) choisie en 2004 par l'ensemble des laboratoires impliqués a été développée par la collaboration Tesla et mise au point sur l'accélérateur Flash (ex TTF) au laboratoire de Desy (*Deutsches elektronen synchrotron*) en Allemagne avec un double objectif : 1- vérifier les performances des différents composants et estimer de façon réaliste les coûts d'un collisionneur de 30 km de long ; 2- démontrer la faisabilité d'un laser à électrons libres fonctionnant en mode d'émission spontanée auto-amplifiée (mode Sase) dans le domaine du rayonnement ultraviolet. Ce deuxième objectif a permis de préparer la construction du projet européen XFEL (*X-ray free-electron laser*) de source de rayonnement X de 4e génération.

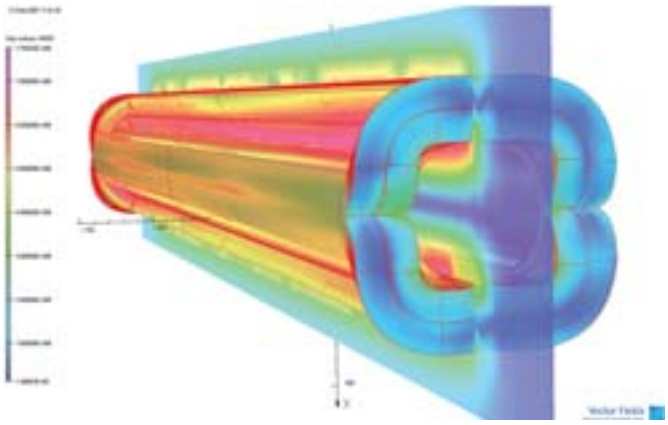
Vue d'artiste des tunnels de l'ILC : galerie des klystrons à gauche, cryomodules accélérateurs à droite (photo KEK).

Le collisionneur ILC

Le projet ILC est basé sur des accélérateurs linéaires à cavités supraconductrices en niobium massif avec des champs accélérateurs de 31 MV/m ou plus. Pour atteindre la luminosité de 2 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$, des tailles transverses de 6 nm au point de collision et des puissances de 11 MW par faisceau sont requises. Les collisions mettent en œuvre de l'ordre de 3000 paquets par impulsion-faisceau contenus dans une impulsion radiofréquence (RF) de 1 ms. La durée de l'impulsion RF, permise par la technologie supraconductrice, autorise la mise en œuvre de méthode d'asservissement rapide (3 MHz) de l'orbite de chacun des paquets au point de collision et soulage ainsi les tolérances d'alignement et de vibrations des éléments accélérateurs et focalisant.

Au sein de l'équipe internationale GDE (*Global design effort*) et du projet européen EuroTeV du 6e programme-cadre de recherche et de développement (6e PCRD), nous sommes engagés dans la conception des lignes de focalisation des faisceaux de haute énergie et de la région d'interaction. Trois thèmes de recherche méritent d'être soulignés :

- l'optimisation automatique de l'optique de focalisation finale incluant la correction locale au niveau du doublet final des aberrations chromatiques du faisceau,
- l'étude de la stabilité des collisions à angle de croisement nul dans une région d'interaction incluant des aimants de focalisation supraconducteurs de large ouverture développés au SACM,
- la conception et la modélisation magnétique du solénoïde du détecteur LDC (*Large detector concept*) défendu par les laboratoires européens de physique des particules.

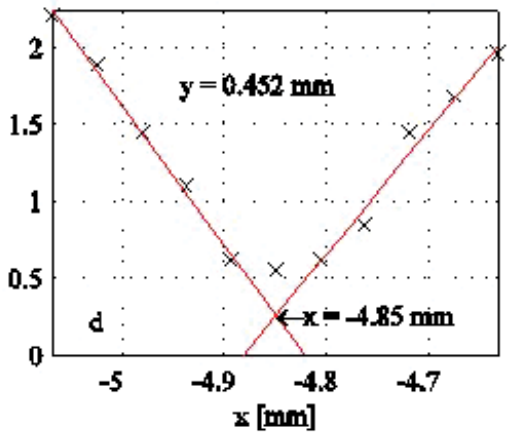


Modélisation magnétique du quadripôle de focalisation finale.

L'accélérateur linéaire supraconducteur Flash

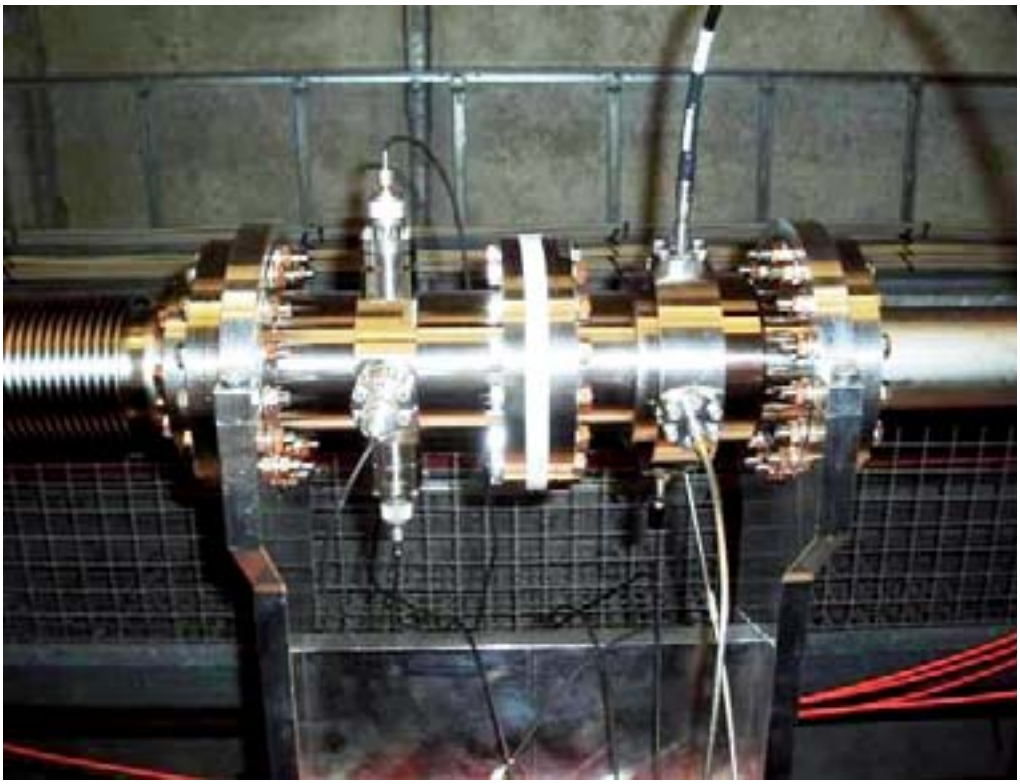
Outre l'opération de 40 cavités accélératrices supraconductrices à haut gradient, pour une énergie totale de l'ordre du giga-électronvolt, l'accélérateur linéaire à électrons Flash permet le développement d'instrumentation et de diagnostics de faisceau destinés à équiper les futurs projets XFEL et ILC. Le SACM est impliqué dans le système de protection de la machine utilisant une électronique rapide de comparaison du courant du faisceau mesuré en différents points le long du linac, et dans la mise en service de moniteurs de position du faisceau utilisant deux techniques originales et complémentaires :

- les cavités RF réentrantes adaptées à l'environnement ultra-propre et cryogénique d'un cryomodule de Flash et visant une résolution de l'ordre du micromètre pour le contrôle de l'orbite du faisceau dans les quadripôles,
- l'utilisation des modes d'ordre supérieurs HOM des cavités accélératrices pour améliorer l'alignement des cavités par rapport au faisceau et minimiser l'effet des champs de sillage.



Alignement du faisceau par minimisation du signal HOM (high order mode) dans la première cavité de Flash.

Le SACM a également conçu un système d'accord à froid de la fréquence RF (1,3 GHz) des cavités accélératrices incluant la régulation piézo-électrique rapide du décalage de la fréquence sous l'effet de la pression de radiation. Ces développements ont été possibles grâce au soutien financier du programme Care-SRF (*Coordinated accelerator research in Europe – Superconducting radio-frequency technology*) du 6e programme-cadre de recherche et développement.



Moniteur de position à cavité radiofréquence réentrante sur la ligne faisceau de Flash.

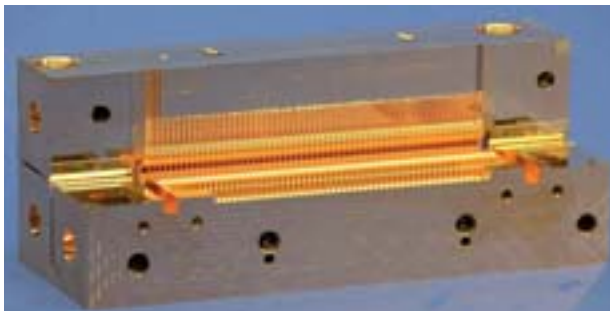
L'accélérateur Califes de CTF3

Le Cern, dans le cadre de son projet de collisionneur linéaire Clic (*Compact linear collider*), a initié un programme de recherche et développement autour de la station d'essais CTF3 (*Clic test facility* 3e phase) qui a pour but de valider les concepts permettant d'atteindre des énergies de 1 à 3 TeV sur une distance de 30 km. La démonstration de la faisabilité technologique doit être achevée pour 2010, date à laquelle les premiers résultats du LHC permettront aux physiciens de décider quel domaine d'énergie sera le plus pertinent pour leurs futurs travaux. Pour réaliser cet ambitieux programme le Cern a fait appel à une large collaboration internationale comprenant à ce jour plus de 15 laboratoires et instituts. Le Dapnia en association avec le LAL (Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay) réalise un accélérateur baptisé Califes (Concept d'accélérateur linéaire pour faisceau d'électrons sonde) destiné à injecter des paquets d'électrons dans les structures accélératrices à haut gradients (100 MV/m) pressenties pour le Clic.

L'obtention de gradient d'accélération aussi important interdit l'usage de structures supraconductrices et nécessite donc une puissance radiofréquence (RF) extrêmement élevée (plusieurs GW crête). Après de nombreuses optimisations la fréquence de 12 GHz est aujourd'hui retenue. Cette puissance est obtenue à partir d'un premier faisceau d'électrons de 150 MeV fonctionnant à 3 GHz dont les trains de paquets sont ensuite recombinés dans 2 anneaux afin de porter leur intensité moyenne de 3,5 à 28 A, avant d'être décélérés dans des structures ad-hoc qui fournissent alors la puissance RF requise au 2e faisceau à 12 GHz. La validation de cette « gymnastique » complexe est le premier des deux principaux objectifs de CTF3.

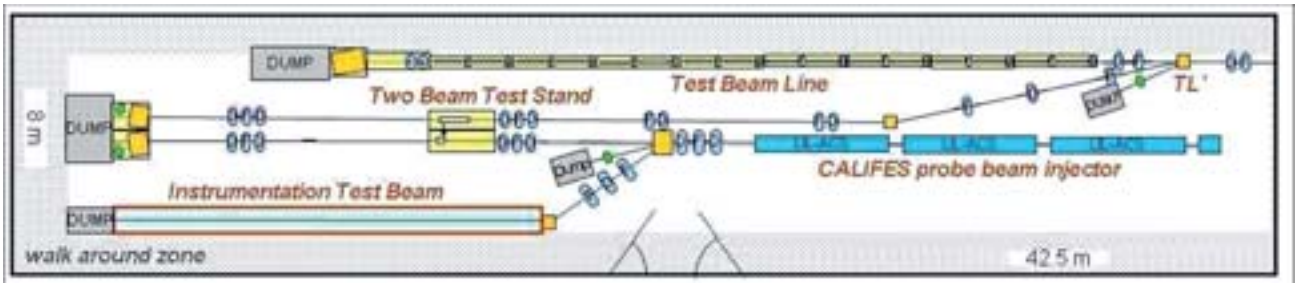
Le 2e objectif est l'optimisation des structures accélératrices afin d'obtenir des taux de claquage aussi faibles que 10^{-6} pour un champ moyen de 100 MV/m pendant 100 ns. Ces structures sont déjà en cours d'expérimentation en puissance mais sans faisceau d'électrons. L'étude du comportement du faisceau dans ces structures nécessite l'injection de paquets d'électrons aux caractéristiques bien précises.

Les caractéristiques particulièrement exigeantes de ce faisceau sonde en terme d'émittance, de dispersion en énergie, de charge et de longueur de paquets, ont rendu nécessaire l'utilisation des techniques les plus modernes dans la conception de l'accélérateur Califes : photo-injecteur et mise en forme des impulsions laser, compression de paquets, compression d'impulsions RF et déphaseur de puissance. De même une chaîne complète de diagnostics (moniteur de courant et de position, profileur de faisceau, cavité déflectrice, dipôle d'analyse…) a été mise en œuvre afin de valider le faisceau avant son utilisation.



Structure accélératrice à haut gradient (photo Cern).

Le Dapnia s'est impliqué dès le début de ce projet, reprenant les spécifications établies par le Cern, proposant une architecture optimisée grâce à des simulations de dynamique du faisceau, organisant la récupération des équipements disponibles, concevant et lançant la réalisation d'équipements nouveaux et cherchant des collaborations à Saclay pour les domaines où sa compétence faisait défaut (manipulation d'impulsions laser). Aujourd'hui la phase d'installation dans le nouveau bâtiment Clex dédié à cette expérimentation à deux faisceaux a commencé. Elle sera suivie de la mise en service en 2008 alors qu'est déjà explorée une suite aux activités du Dapnia dans CTF3 par la participation aux travaux sur les structures à haut gradient accélérateur et le développement d'instrumentation spécifique.



Implantation de l'accélérateur Califes dans l'installation Clex.

Développements pour les accélérateurs de particules

Développement de sources d'ions

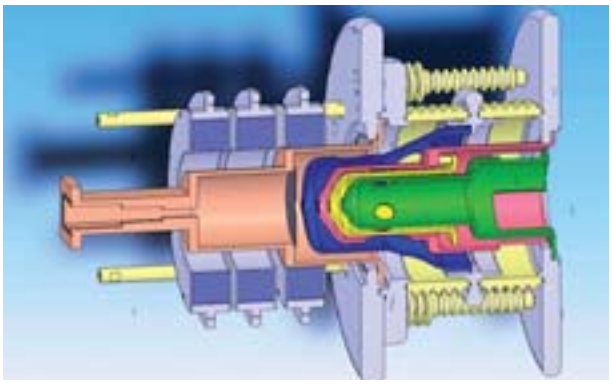
Le SACM est un des laboratoires mondiaux de pointe pour la production intense d'ions légers qui sont demandés par les futurs accélérateurs à fort courant. Les faisceaux, extraits de sources d'ions avec une énergie de plusieurs dizaines de keV, peuvent atteindre une puissance de l'ordre de 10 kW. Grâce aux résultats obtenus avec la source Silhi, le SACM construira les sources de deutons (D^+) devant équiper les accélérateurs Spiral 2 et Ifmif.

La source Silhi, développée dans le cadre du projet Iphi, a démontré l'efficacité des sources à résonance cyclotronique électronique (ECR) pour produire des faisceaux intenses de protons (H^+). Des mesures récentes, en collaboration avec le centre de recherche sur les ions lourds GSI, en Allemagne, et l'Université de Francfort ont confirmé les qualités du faisceau extrait en mode pulsé.

La difficulté du transport à basse énergie est due à la variation de compensation de charge d'espace le long de la ligne. Ce problème qui a fait l'objet d'une première étude et d'une thèse au SACM, devra être mieux maîtrisé pour que le faisceau extrait de la source du projet Ifmif réponde aux conditions requises.

Une nouvelle source dont le champ magnétique axial est fourni par des aimants permanents a été développée pour répondre aux exigences du projet Spiral 2. Cette source est capable de produire un faisceau continu de 5 mA de D^+ à 40 keV, tout en respectant les qualités de fiabilité, d'émittance et de flexibilité des paramètres. De plus, une légère modification a permis de produire une intensité totale supérieure à 100 mA à une énergie de 95 keV, en injectant du gaz hydrogène dans la chambre du plasma. La source finale de Spiral 2 sera également construite et testée très prochainement dans le service.

En parallèle, l'étude d'une source d'ions négatifs (H-) s'est poursuivie, jusqu'en décembre 2005, dans le cadre d'un réseau européen du 5e programme cadre de recherche et de développement (5e PCRD) dont le SACM était le coordonnateur. Les résultats obtenus avec la source ECR sont encore modestes mais encourageants : une intensité supérieure à 4,5 mA en mode pulsé. Pour accroître les performances, des calculs théoriques ont permis de définir une structure magnétique multipolaire qui sera associée à une nouvelle chambre de plasma.



Coupe d'une source à aimants permanents avec son système d'extraction du faisceau de deutons ; de gauche à droite, le guide d'onde hyperfréquence, la chambre du plasma et les électrodes d'extraction.

Afin de prolonger et amplifier ces développements, un banc d'études et de tests des sources d'ions, Betsi, est en cours de construction. Pour caractériser et optimiser les futures sources de Spiral 2 et d'Ifmif, il paraît opportun de l'équiper d'une ligne instrumentée dédiée à l'analyse des faisceaux à basse énergie.

Source de deutons accrochée au tube accélérateur.

Développement de structures accélératrices supraconductrices

Dans le cadre du programme européen Care (*Coordinated accelerator research in Europe*), le SACM participe à un développement axé sur les accélérateurs pulsés à protons de forte intensité, Hippi (*High intensity pulsed proton injector*). Au travers de la recherche et du développement nécessaires pour ce type d'accélérateur, dix instituts européens coordonnent leurs efforts dans le but d'apporter des améliorations à de grandes installations européennes du Cern à Genève, du *Rutherford Appleton Laboratory* et du GSI à Darmstad. L'objectif est d'accroître les flux de protons et de neutrinos pour les futures expériences de physique.

Cavité accélératrice supraconductrice elliptique à 704 MHz. Ce type de cavité de ß = 0,5 (vitesse relative des protons par rapport à celle de la lumière) est particulièrement adapté pour couvrir le domaine d'énergie de 100 à 200 MeV.

Une partie importante du programme Care/Hippi est axée sur le développement de structures accélératrices supraconductrices - particulièrement efficaces pour l'accélération de faisceaux intenses à fort cycle utile - opérant dans la gamme d'énergie 100-200 MeV et atteignant des gradients accélérateurs supérieurs à 7 MV/m avec des facteurs de surtension de 10^{10}.

Le SACM est un acteur majeur de ce programme, puisqu'il a la charge de fabriquer et tester des prototypes de cavités supraconductrices, de développer et de conditionner des coupleurs de forte puissance, et d'installer et rendre opérationnelle une station d'essais composée du cryostat horizontal Cryholab et d'une source de puissance radiofréquence à 704 MHz de 1 MW crête.

Cavités supraconductrices à 704 MHz

Plusieurs types de cavités supraconductrices existent, le choix se faisant en considérant la particule à accélérer et son énergie. Pour le cas particulier des linacs de 100-200 MeV, les protons ont une vitesse relative par rapport à la célérité de la lumière ß qui varie entre 0,4 et 0,6. Les cavités elliptiques de ß égal à 0,5 sont particulièrement adaptées pour couvrir ce domaine d'énergie. Toutefois, leur fonctionnement en mode pulsé peut être assez délicat du fait des forces de pression électromagnétique qui s'exercent sur les parois et, en conséquence, modifient la fréquence de la cavité. Ce phénomène est d'autant plus important que le niveau de champ est élevé et peut empêcher l'accélération correcte du faisceau.

Afin de dépasser cette limitation, le SACM a conçu, étudié et réalisé une cavité supraconductrice à 704 MHz de type elliptique susceptible d'atteindre des champs accélérateurs élevés (après optimisation des champs de surface et du rendement d'accélération) tout en maîtrisant ses variations de fréquence grâce à un double système d'anneaux rigidificateurs.

Développement de coupleurs de puissance à 704 MHz

Pour accélérer le faisceau de protons (plusieurs dizaines de mA) avec des champs élevés (10 à 20 MV/m), chaque cavité doit être alimentée en puissance hyperfréquence de plusieurs centaines de kW. Le coupleur de puissance assure ce rôle.

Le SACM développe un coupleur capable de transmettre à la cavité jusqu'à 1 MW en mode pulsé, et 100 kW en valeur moyenne. Un prototype de la fenêtre en alumine qui assure la séparation entre l'ultravide de la cavité et l'air ambiant, tout en réalisant l'adaptation de la haute fréquence, a été réalisé. Il a été testé à faible puissance pour vérifier ses caractéristiques à haute fréquence. Deux coupleurs complets sont en cours de réalisation.

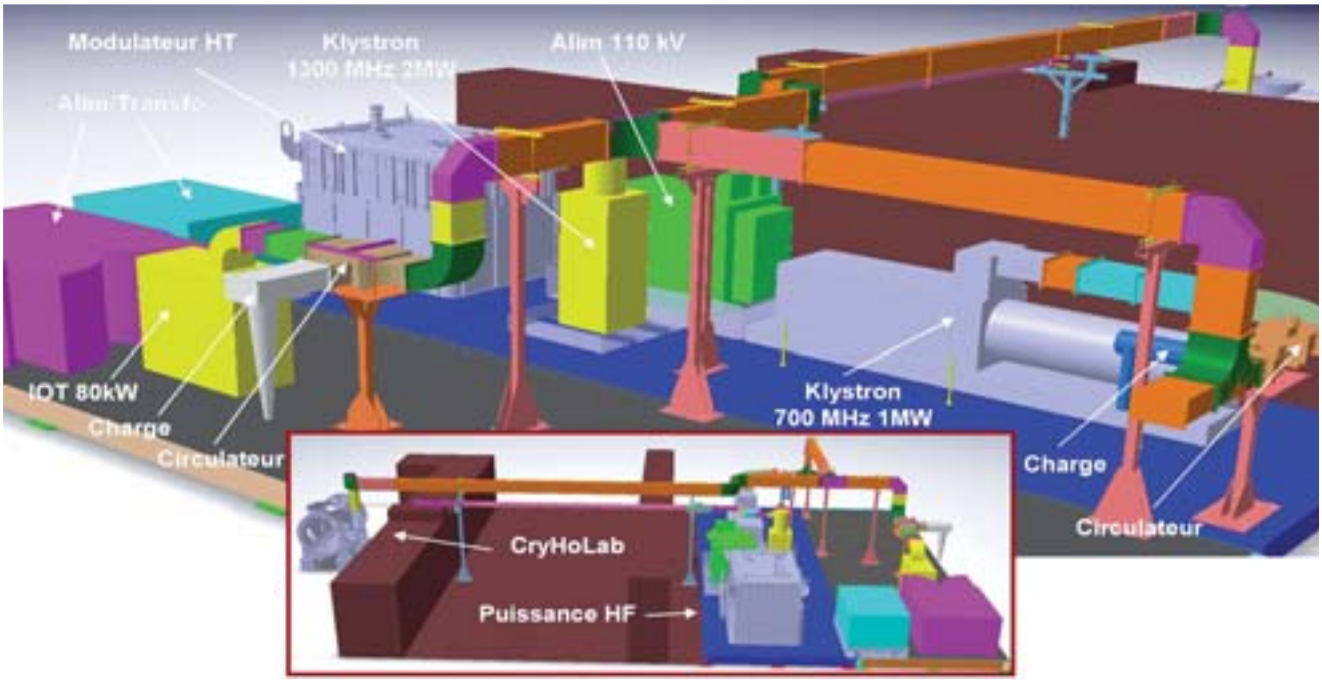
Coupleur de puissance de 1 MW pulsé pour les linacs supraconducteurs à protons. Les principaux éléments constituant le coupleur sont, de droite à gauche du schéma, la transition entre le guide d'onde et le coaxial, le coaxial, la fenêtre et la gaine refroidie.

Fenêtre du coupleur de puissance de 1 MW. La fenêtre en alumine assure la séparation entre l'ultravide de la cavité et l'air ambiant.

Banc de test des coupleurs

Afin de tester l'ensemble des composants, le SACM s'équipe d'un banc de puissance à 704 MHz fournissant plus de 1 MW en mode pulsé. Le banc se compose d'une alimentation de 110 kV, d'un modulateur générant des pulses de 2 ms à 50 Hz, et bien sûr du klystron qui génère la puissance hyperfréquence. La sortie du klystron peut être connectée, au travers d'un réseau de guides d'onde, à un banc de test et au cryostat d'essai Cryholab, ce qui permet d'étudier et de conditionner les coupleurs de puissance et de réaliser les essais des cavités dans un environnement comparable à celui d'un accélérateur.

Installation de puissance haute fréquence du SACM comprenant les bancs de puissance à 704 MHz et à 1300 MHz.



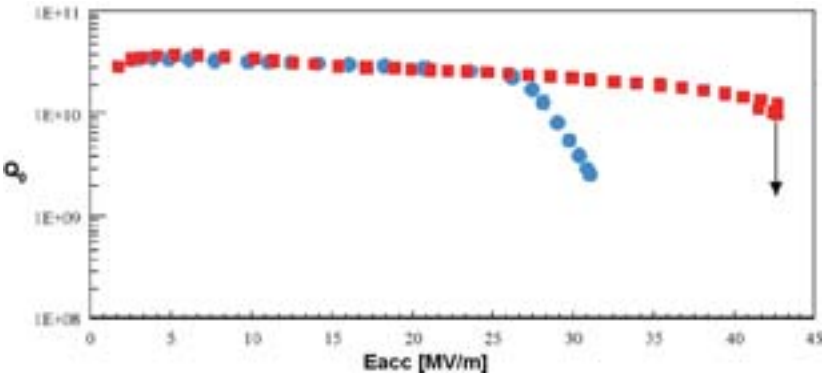
R et D en supraconductivité radiofréquence

Afin de réduire la longueur et donc le coût du futur accélérateur linéaire supraconducteur ILC (*International linear accelerator*) il est nécessaire de construire des structures accélératrices (cavités radiofréquence à neuf cellules) mesurant un mètre de long et pouvant atteindre des champs accélérateurs de 35 voire 40 MV/m. On sait déjà obtenir de telles performances sur des cavités en niobium massif à condition que celles-ci subissent un traitement de surface par voie électrochimique ainsi qu'un étuvage modéré à 120°C pendant 48 heures. Cependant les résultats obtenus par électrochimie ne sont pas suffisamment fiables et reproductibles, quant au processus d'étuvage il n'est pas optimisé pour pouvoir envisager une production industrielle de 20 000 cavités. La R&D « hauts gradients accélérateurs », poursuivie à Saclay, tente d'apporter des solutions à ces problèmes en optimisant les paramètres de l'électropolissage et en recherchant une procédure d'étuvage plus performante.

Étude de l'électro-polissage

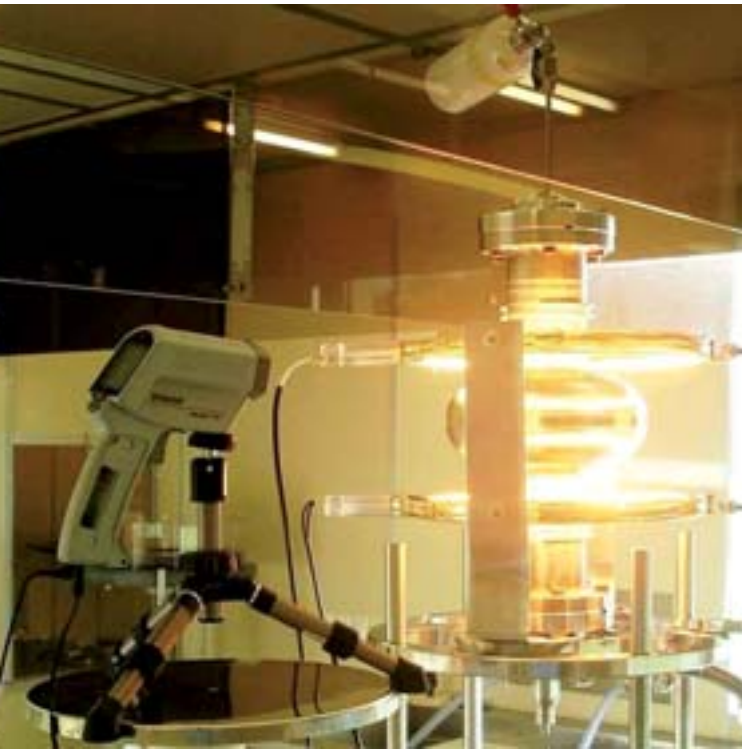
En ce qui concerne l'électrochimie, les premiers travaux ont été effectués sur des échantillons de niobium afin de mettre au point des mélanges d'acides plus performants, tout en essayant de diluer au maximum les acides présents dans le mélange pour des raisons de sécurité. Les études ont également porté sur les résidus solides (soufre) ou gazeux (hydrogène) générés lors du traitement. La présence de ces éléments dans le matériau niobium ou à sa surface nuit aux bonnes performances des cavités. Des solutions ont été trouvées : le rinçage à l'alcool permet, par exemple, de dissoudre le soufre.

Au cours de l'année 2006 un banc d'électropolissage pour des cavités mono-cellulaires a été réalisé et mis en service. Une première cavité a été électropolie à la fin du mois d'octobre 2006 et a atteint, après un étuvage, un champ de 43 MV/m. Ce banc d'électropolissage va permettre de valider sur des cavités les nouvelles avancées obtenues sur des échantillons.



Performances de la première cavité en niobium électropolie au SACM. Évolution du facteur de qualité de la cavité Q en fonction du champ accélérateur : avant (courbe bleue) et après (courbe rouge) un étuvage sous vide de la cavité à 120°C pendant 48 heures.

Dispositif d'électropolissage horizontal de cavités supraconductrices en niobium.



Dispositif à lampes à rayonnement infrarouge pour étuvage rapide.

Amélioration du procédé d'étuvage

L'étuvage est l'ultime étape nécessaire pour réduire la dégradation du facteur de qualité à fort champ électrique et obtenir des champs accélérateurs plus élevés.

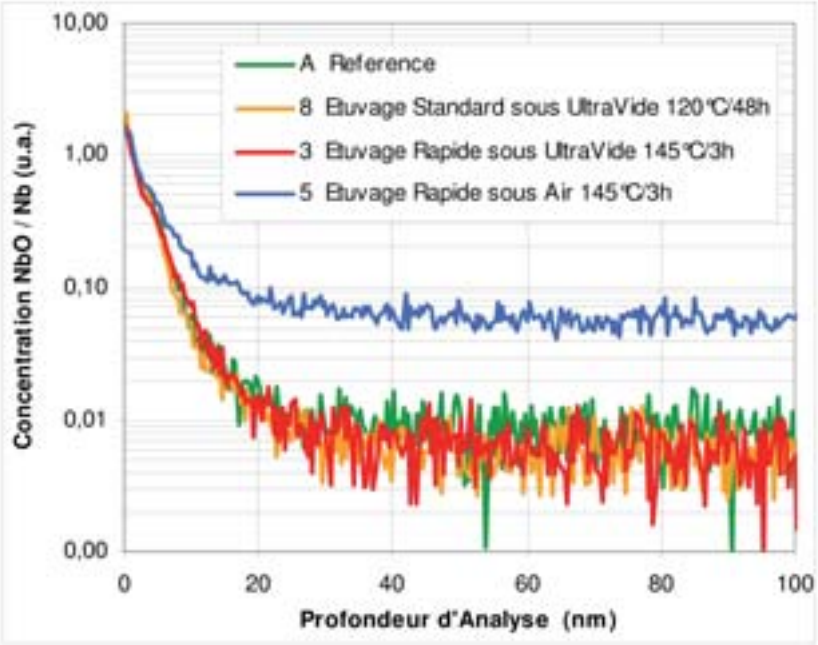
Le traitement consiste à maintenir la cavité sous ultravide et à une température de 120°C pendant 48 heures. Or, pour une production en masse de cavités, le temps d'étuvage est trop long et le procédé trop contraignant à cause du conditionnement sous ultra-vide de la cavité. L'utilisation de lampes à rayonnement infrarouge a permis de mettre au point un procédé d'étuvage équivalent, toujours sous ultravide, mais plus rapide (3 heures à 145 °C).

Les conditions opératoires pour pouvoir réaliser l'étuvage à la pression atmosphérique sous air ambiant ou gaz neutre (argon) sont actuellement à l'étude.

Analyses de surface

L'étuvage modifie les caractéristiques du supraconducteur sans que l'on en connaisse véritablement la cause. Depuis la découverte du phénomène, l'hypothèse d'une diffusion d'oxygène interstitiel à l'interface entre l'oxyde et le métal a souvent été avancée comme une cause possible. Or, les analyses de surface menées par notre laboratoire en utilisant la méthode de spectroscopie de masse d'ions secondaires (Sims) sur des échantillons de niobium ont montré qu'aucune diffusion notable d'oxygène interstitiel n'est observée.

Pour expliquer le phénomène physique de l'étuvage, d'autres explications sont également avancées, par exemple le comblement de lacunes à l'interface entre l'oxyde et le métal. Ces nouvelles hypothèses seront expérimentalement vérifiées et éventuellement validées dans un proche avenir.



Profil de pénétration de l'oxygène interstitiel déterminé par la méthode SIMS (spectroscopie de masse d'ions secondaires). La couche d'oxyde de niobium Nb2O5 en surface s'étend sur une profondeur de 4 nm.

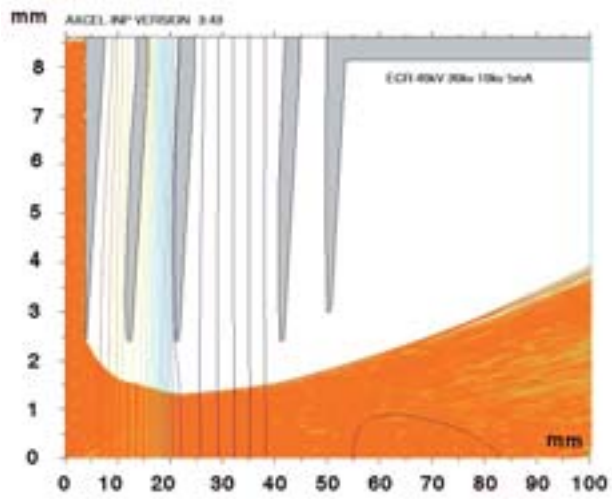
Dynamique des faisceaux de particules

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 divers. Sur le plan fondamental, citons la prise en compte de l'interaction avec le gaz résiduel, de l'interaction avec les interfaces solides, la dynamique des plasmas des sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électro-magnétiques d'ordres élevés (hexapôles, octupôles), la maîtrise de la formation du halo et des pertes du faisceau pour la maintenance des futurs accélérateurs de puissance. Sur un autre plan, il faut citer l'optimisation du coût des systèmes accélérateurs. 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, comme le calcul distribué en grappes.

Simulation du faisceau dans les sources à résonance cyclotronique électronique

Depuis près de dix ans, l'émergence de nombreux projets a incité le CEA et le CNRS à collaborer dans le domaine des accélérateurs à fort courant et notamment à développer un démonstrateur à basse énergie, l'injecteur de protons à haute intensité Iphi. Parmi ces projets, on peut citer Spiral 2 à Ganil ou Ifmif qui souhaitent des faisceaux de deutons, le projet Fair à GSI ou les réacteurs hybrides qui souhaitent des protons. D'autres projets, comme le SPL au Cern, le *proton driver* à Fermilab ou les sources de spallation nécessitent des ions hydrogène négatifs qui seront ensuite injectés dans des anneaux de compression.

Toutes ces machines demandent une source d'ions performante et fiable que le Dapnia/SACM est à même de concevoir et de construire.



Simulation, avec le code Axcel, de l'extraction d'un faisceau de deutons de 5 mA à 40 kV. En gris, sont figurées les coupes des 5 électrodes et, en orange, les trajectoires des particules.

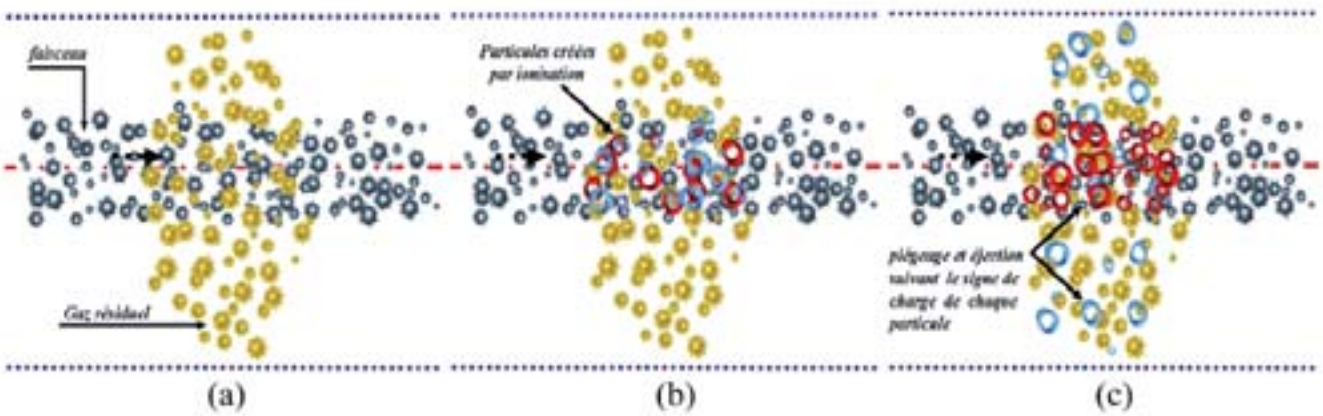


Schéma décrivant le processus de compensation de la charge d'espace.

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

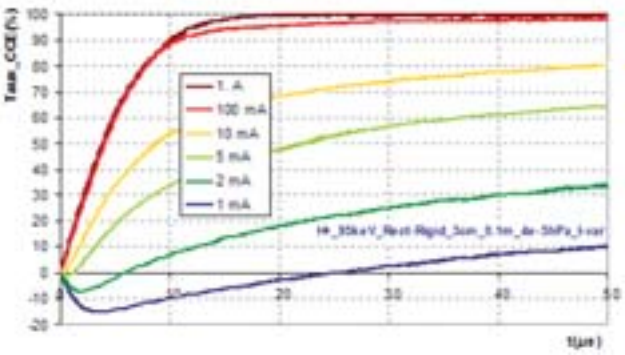
Sachant que la qualité du faisceau à basse énergie influence fortement le design de l'accélérateur, il est important de poursuivre les développements sur les sources et leur système d'extraction. Une meilleure compréhension de la création du plasma et de l'interaction de l'onde radiofréquence avec le plasma, basée sur le développement d'un code de calcul, permettrait de s'affranchir de certaines hypothèses pour la conception des machines.

Transport de particules dans une ligne à basse énergie

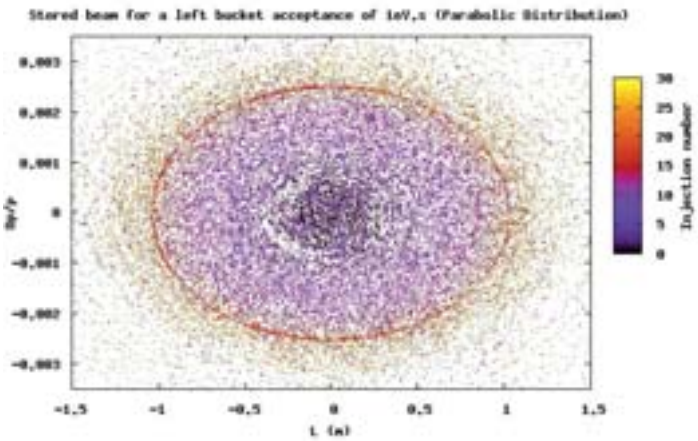
Au-delà de la zone d'extraction, le transport du faisceau est simulé dans la ligne de basse énergie avec différents codes développés au SACM consacrés à la simulation de faisceaux d'ions multi-espèces en régime de charge d'espace ou de compensation de charge d'espace.

L'émittance de la partie à basse énergie d'un accélérateur doit être contrôlée car elle conditionne son fonctionnement à plus haute énergie. Dans le cas des accélérateurs à fort courant comme Iphi, le faisceau extrait de la source doit être conduit en limitant ses pertes ainsi que l'augmentation de son émittance.

La dynamique de ces faisceaux intenses est dominée par des effets non linéaires du champ de charge d'espace. Au passage du faisceau, des atomes du gaz résiduel de la chambre à vide sont ionisés ce qui induit une compensation partielle de la charge d'espace. Pour faire une simulation plus fine et avoir un meilleur accord avec les mesures expérimentales faites sur la source Silhi, des travaux ont été menés dans le cadre d'une thèse du SACM. Ceci a permis d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans la dynamique des faisceaux intenses en régime de compensation de charge d'espace.



Évolution temporelle du taux de compensation de la charge d'espace pour 6 intensités différentes d'un faisceau d'ions H^+.



Représentation dans l'espace des phases énergie-position du faisceau après 30 injections. Les injections les plus récentes sont en noir, les plus anciennes en jaune. Les particules les plus anciennes repoussées au-delà de la limite matérialisée par l'ellipse rouge ne sont plus acceptées par la machine. Ces ions doivent être collectés avant de heurter les parois de la chambre à vide.

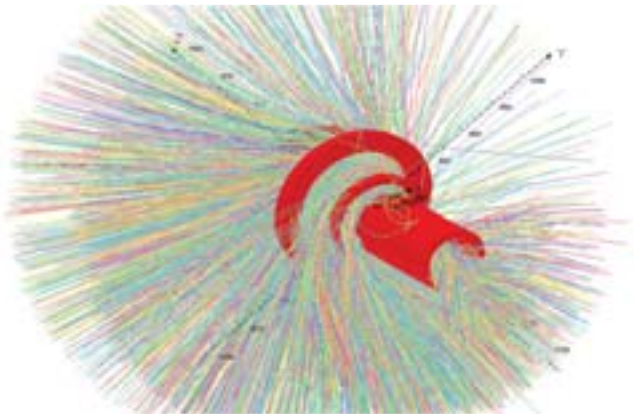
Dynamique des *beta-beams*

La connaissance des propriétés des neutrinos est un des défis de la physique contemporaine. Jusqu'à présent les physiciens ont utilisé les sources disponibles : neutrinos provenant de l'espace ou des centrales nucléaires. Les études futures demanderont des faisceaux de neutrinos plus intenses et mieux définis en énergie et en saveur. Les *beta-beams* sont une des nouvelles sources envisagées pour produire des faisceaux de neutrinos.

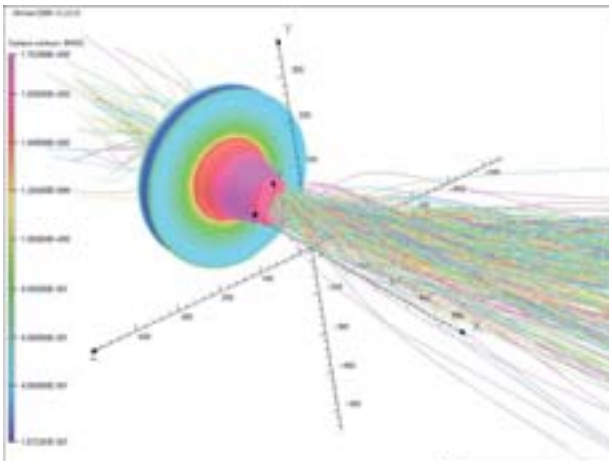
Les études sont menées dans le cadre du projet européen Eurisol, en collaboration avec de nombreux laboratoires dont le CNRS, le Cern, GSI. Il s'agit d'utiliser la radioactivité beta des noyaux He^6 et Ne^{18} comme source de neutrinos. Suivant l'espèce on produit des neutrinos ou des antineutrinos électroniques avec un spectre en énergie connu et relativement étroit. Après accélération, les noyaux beta radioactifs sont stockés dans un anneau de 7 km de circonférence, dont la définition est assurée par le SACM, comportant deux longues sections droites alignées en direction du site expérimental. À chaque révolution, une proportion bien définie des noyaux stockés se désintègre, émettant des neutrinos dans leur direction de propagation. Les désintégrations ayant lieu dans l'une des sections droites produisent un pulse court de neutrinos dirigés vers le détecteur. Les noyaux résultants, Li^6 ou F^{18}, sont eux perdus dans l'anneau et sont une source d'activation qu'il faut contrôler. Pour obtenir le flux de neutrinos nécessaire aux expériences, il faut accumuler un nombre suffisant de noyaux dans l'anneau de décroissance et compenser périodiquement les désintégrations en injectant de nouveaux noyaux. Ces processus sont aussi à l'origine de pertes qui doivent être maîtrisées.

Développements d'une source de positons

Prolongement technologique de la R&D fondamentale du SPP sur l'anti-hydrogène, le projet Sophi est la réalisation d'une source de positons de haute intensité. Les positons sont produits par interaction des électrons avec une cible en tungstène, puis collectés et guidés par un système magnétique. L'originalité du système vient de la faible énergie des électrons incidents qui conduit à un faisceau de positons ayant une forte dispersion en énergie et en impulsion. La difficulté réside dans la capture de ces positons et dans leur séparation des électrons qui sont encore 1000 fois plus nombreux que les positons.



Flux d'électrons après la cible en tungstène.



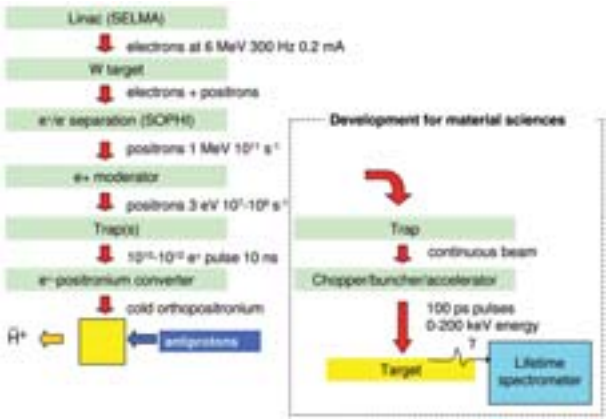
Flux de positons après la cible.

La finalité de l'expérience "anti-hydrogène" est de vérifier le signe et l'intensité de l'accélération de la pesanteur terrestre pour l'anti-matière. Dans les cas extrêmes des modèles lui laissant la possibilité d'être négative cela se traduirait par une élévation et non une chute d'un atome d'anti-matière soumis à la seule force de la gravité terrestre.

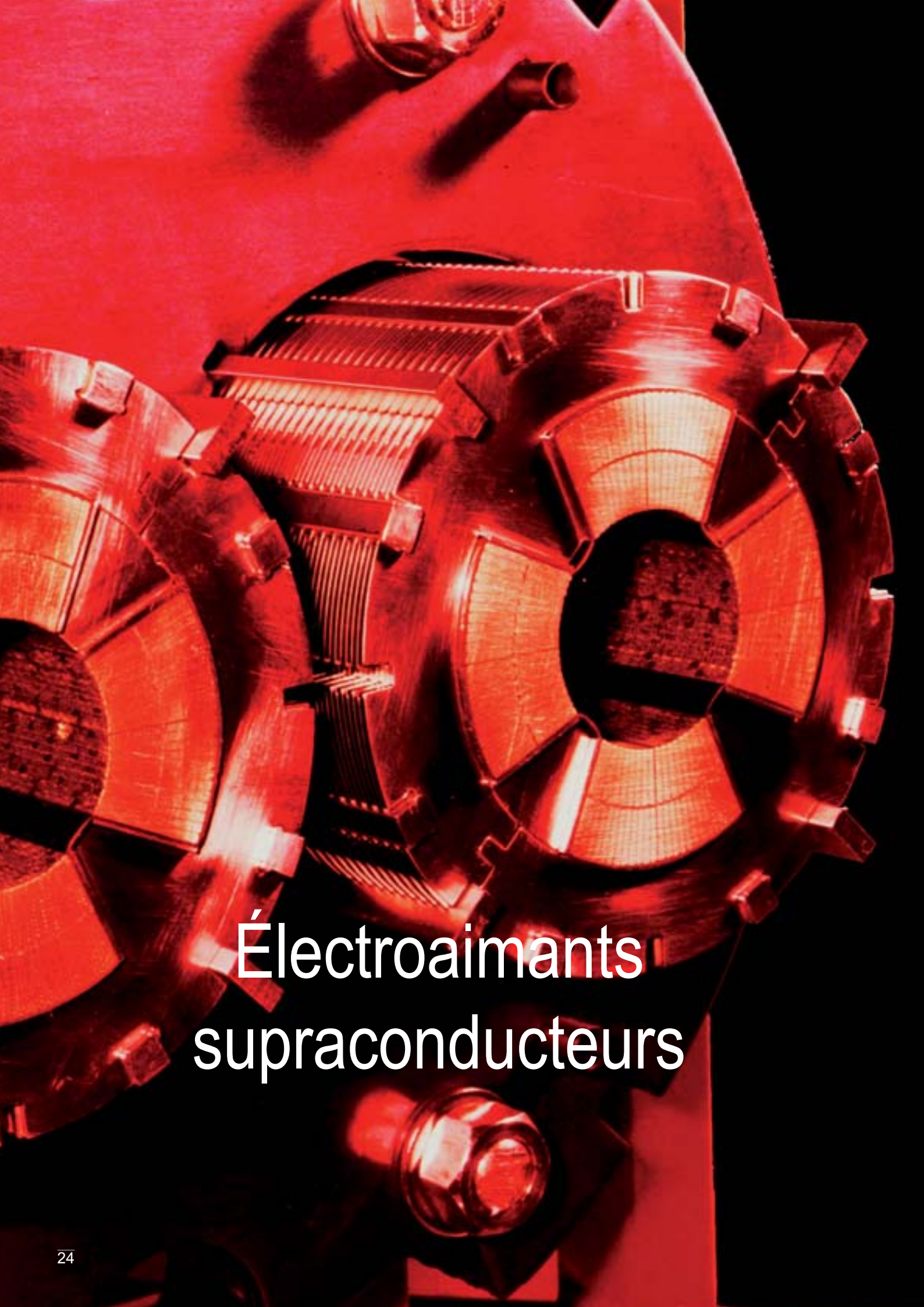
La construction de cette source, basée sur un concept breveté par les physiciens Patrice Perez et André Rosowsky, a été financée par l'Agence nationale de la recherche en 2005, et complétée en 2006 par un financement du Conseil général de l'Essonne pour l'acquisition d'un mini accélérateur linéaire à électrons de 6 MeV appelé Selma.

En 2006 le dimensionnement du système de capture et de tri magnétique a été optimisé en intégrant les paramètres du linac. Les études d'implantation et de sécurité ont été menées à bien pour préparer l'installation dans le bâtiment 126. En octobre 2007 Sophi et Selma seront installés dans le hall de l'ancien accélérateur Saturne. Cet ensemble permettra de démontrer la faisabilité d'une source intense de positons capable de remplir les pièges des expériences sur l'anti-hydrogène au Cern.

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



Les principes expérimentaux pour réaliser l'anti-hydrogène et pour les applications en sciences des matériaux.



Électroaimants supraconducteurs

Les quadripôles supraconducteurs pour le LHC

Dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France à la construction du *Large hadron collider* (LHC), le SACM s'est vu confier la conception des masses froides des quadripôles principaux de la machine. Les principales difficultés technologiques sont dues à la nécessité d'une grande précision mécanique pour assurer une homogénéité de champ magnétique de 10^{-4} sur les trois mètres de l'aimant, à d'importantes forces électromagnétiques d'éclatement de 4 fois 110 tonnes par mètre d'aimant. En outre, la conception doit être adaptée à la production industrielle de 400 unités. Après avoir transféré son savoir-faire à l'industrie, le SACM a assuré le suivi de la fabrication des aimants de série confiée à l'industriel allemand Accel, qui a livré au Cern la dernière masse froide à l'automne 2006.

Les quadripôles présentent une configuration à double ouverture réunie dans une même structure magnétique et cryogénique. Les principales caractéristiques d'un aimant sont une longueur de 3,2 m, une ouverture de 56 mm et un gradient de champ de 223 T/m.

Une masse froide conssiste en une enceinte à hélium contenant trois aimants à double ouverture, un aimant quadripolaire principal et deux aimants correcteurs. L'aimant quadripolaire principal comporte deux ouvertures dans lesquels circulent les particules de chaque faisceau.

Pour chacune de ces ouvertures quatre bobinages supraconducteurs sont frettés dans un ensemble commun de colliers en inox qui les rendent solidaires. L'essentiel des performances de l'aimant dépend du soin appliqué lors du bobinage du câble supraconducteur et du frettage des bobines. Bien que ces bobines mesurent 3 m de long pour un rayon moyen de 4 cm, l'ordre de grandeur pour juger de leur qualité est la vingtaine de microns. Cette dimension garantit la qualité de leur champ magnétique qui servira à focaliser le faisceau de particules ainsi que leur stabilité mécanique.

Suivi de la réalisation industrielle

La phase de suivi de fabrication a été assurée par un technicien du SACM présent chez Accel une semaine sur deux et deux ingénieurs. L'organisation de l'équipe a permis d'assurer une présence sans interruption afin de pouvoir réagir très rapidement aux demandes de l'industriel. Le rythme était en effet de 4 masses froides par semaine en phase nominale de production. Toute interruption avait donc d'importantes répercussions financières. Les masses froides ont été contrôlées chez l'industriel aux principales étapes de la fabrication : durant et après le bobinage et lors du frettage. La finesse des mesures magnétiques à chaud en a fait un instrument privilégié de détection de défaut. Le banc installé chez l'industriel a montré son efficacité à mi-production en détectant que la perméabilité de l'acier austénitique des colliers de frettage était de 10 % supérieure à la valeur nominale. Les effets parasites ont pu être annulés en choisissant astucieusement la position des aimants concernés dans la machine, ce qui a limité le retard et a permis d'utiliser la majeure partie de ces colliers, le temps que le fournisseur de l'acier revienne à la qualité nominale.

Originalité du système de qualité mis en place

L'outil principal du suivi de fabrication que nous avons utilisé est le système de gestion des non-conformités. Ses objectifs sont de pouvoir réagir rapidement si un défaut est détecté à chaque étape de fabrication jusqu'aux tests d'acceptation à froid au Cern et de disposer de l'historique des masses froides durant les

Stockage des aimants quadripolaires avant leur assemblage dans les masses froides (photo Accel).

Descente de la première masse froide dans le tunnel du LHC le 19 avril 2005 (photo Cern).

vingt années d'exploitation du LHC.
Le délai de trois mois entre la fabrication et le test d'un aimant correspondait à la production d'une quarantaine de masses froides. Toute déviation devait être connue et analysée pour prendre des mesures correctives adaptées le plus tôt possible. Pour réduire les incertitudes, un aimant quadripolaire principal sur dix a été testé seul. Cette procédure a permis de vérifier dès juillet 2002 que le transfert industriel s'était correctement effectué. Sur les 400 masses froides, seul un aimant a été refusé.

Retour d'expérience de la collaboration

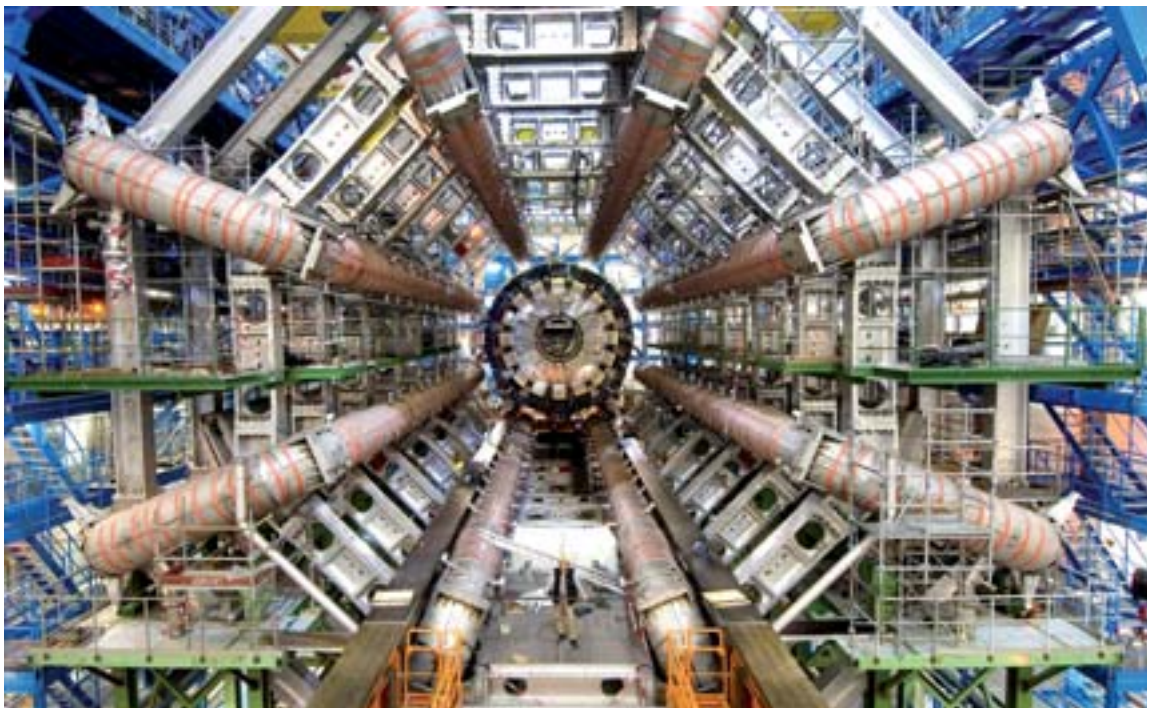
En décembre 2004, la 100e masse froide de série était célébrée. En novembre 2006, 6 ans après la signature du contrat avec Accel, la production était terminée. Ceci concluait les 10 années de l'accord de collaboration entre le Cern et le CEA. Cet accord formalisait en fait une collaboration de 17 ans entamée à la fin des années 80, reposant sur le savoir faire du CEA éprouvé lors de la fabrication des quadripôles de la machine Hera. Deux prototypes avaient ainsi déjà été conçus, fabriqués par le SACM puis testés en 1994 au Cern.

L'étroite collaboration entre le SACM et le Cern a été le moteur de la réussite de ce projet. Les deux laboratoires ont combiné leurs expertises dans un esprit de confiance mutuelle et en respectant des procédures de contrôle de la qualité bien élaborées.

100e masse froide de série (photo Accel).

L'aimant toroïdal pour le détecteur Atlas

Les détecteurs de physique comme ceux du futur *Large hadron collider* (LHC) au Cern nécessitent des champs magnétiques intenses qui courbent la trajectoire des particules afin d'en mesurer la quantité de mouvement. Le système magnétique du détecteur Atlas du LHC est formé de plusieurs aimants supraconducteurs à la température de l'hélium liquide, soit -269 °C. Il comprend un toroïde central, deux toroïdes d'extrémité et un solénoïde central. Le Dapnia a été responsable de la conception et du suivi industriel de la construction du toroïde central dans le cadre d'un accord de collaboration signé avec le Cern en 1997.



Toroïde central d'Atlas dans sa caverne (photo Cern).

L'expérience Atlas

L'expérience Atlas est, entre autres, composée d'un spectromètre de grande dimension pour les muons, particules de très haute énergie. Cet ensemble permet, grâce à 3 couches concentriques de détecteurs du type chambres à fils, de mesurer très précisément la trajectoire des muons courbée par un champ magnétique intense.

Des physiciens du Dapnia voulaient obtenir ce champ magnétique sans la présence de fer magnétisé qui perturberait les muons ; ils ont donc imaginé le concept de grand toroïde à air. Par la suite, la grande proximité des physiciens et des ingénieurs au Dapnia a rendu possible la naissance de cette conception très originale. Dans cet important projet, on trouve à coté du Dapnia, le *Laboratorio acceletori e superconduttività applicata* (Milan) de l'INFN et plusieurs équipes du Cern, chacun apportant sa contribution à différentes parties de l'aimant.

Le spectromètre à muons d'Atlas baigne dans un très grand champ magnétique qui entoure l'ensemble de l'expérience. Pour construire un aimant capable de produire un tel champ, les ingénieurs-chercheurs du Dapnia ont conçu un ensemble de huit bobines supraconductrices de forme rectangulaire de 25 m de long sur 5 m de large, alimentées par un courant de 20500 ampères. Le champ magnétique ainsi produit entoure l'expérience à la manière d'un tore, d'où l'appellation "toroïde" pour l'aimant géant d'Atlas.

Les huit bobines supraconductrices de l'aimant toroïdal

Avant de construire les premières bobines du toroïde, le Dapnia a d'abord élaboré la bobine B0, prototype de longueur réduite à 1/3. Cette "petite" bobine de la taille d'un autobus londonien a permis de valider les choix technologiques envisagés pour la construction des aimants finaux dans les domaines mécaniques, thermiques et électriques. Réalisée en 1999 à Saclay, B0 a utilisé les composants et les modes d'assemblage prévus pour la fabrication en série, et a été testée dans le courant de l'année 2001 avec succès au Cern.

Intégration au Cern des écrans : la superisolation multicouche a été déposée sur la partie gauche de la bobine du premier plan ; en arrière plan, l'écrantage est achevé (photo Cern).

Après les essais de la bobine prototype B0 en 2000 et 2001, les bobines définitives de l'aimant toroïdal ont été réalisées au Cern à partir de composants fournis par de nombreux industriels européens. Le Dapnia a assuré le suivi industriel de la fabrication de la plupart des composants et le suivi technique de leur assemblage au Cern.

Trente kilomètres de câbles supraconducteurs ont été nécessaires pour fabriquer ces bobines, qui sont refroidies à la température de l'hélium liquide. Pour garantir le fonctionnement des aimants supraconducteurs, on procède à des essais individuels de chaque bobine sur une station de test en surface, avec des courants d'intensité supérieure à celle prévue. C'est ainsi que, le mardi 7 septembre 2004 à 1 h 42, BT1, la première des bobines du toroïde central, a pour la première fois supporté l'injection d'un courant de 22000 ampères. BT1 était devenue de ce fait la plus grande bobine supraconductrice au monde "bonne pour le service".

Les huit bobines ont ensuite été testées une par une en surface avec un courant de 22 000 ampères, descendues sous terre, puis assemblées en 2005 dans la caverne d'Atlas à 100 m sous terre, à l'aide d'une structure métallique en aluminium. Positionnées en étoile, et à quelques millimètres près, ces bobines occupent un volume équivalent à celui d'un immeuble de six étages. Cette structure devra supporter les 1400 tonnes du détecteur de muons et résister à des forces magnétiques hors du commun.

Descente de la 8e bobine dans la caverne d'Atlas (photo Cern).

Première des huit bobines du toroïde central en cours d'essai au Cern sur la station d'essai cryogénique (photo Cern).

Le jeudi 29 septembre 2005, l'aimant toroïdal a été libéré de son berceau de maintien. La déformation de la structure après libération a été prédite par les calculs avec une telle précision que le relâchement des vérins prévu initialement en cinq jours s'est achevé au bout de 48 heures, tout en respectant la géométrie attendue au millimètre près.

L'anneau cryogénique

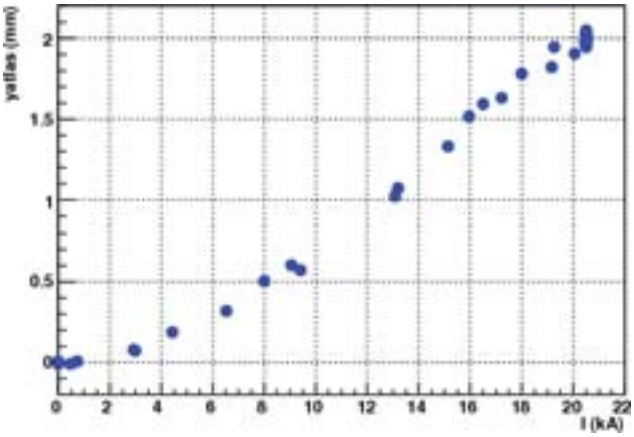
Une ligne de distribution cryogénique, divisée en 8 secteurs, est située sur le rayon externe du toroïde, longitudinalement près du centre de l'aimant. Chaque secteur, long de 6 m, distribue les fluides cryogéniques (hélium gazeux et hélium liquide) et la puissance électrique aux huit bobines. Le secteur du haut est raccordé au cryostat des amenées de courant. Le secteur du bas comprend une boite à vannes cryogéniques permettant la distribution des fluides dans les huit secteurs. Les trois types de secteurs ont été fabriqués à Saclay avant leur livraison au Cern. L'installation sur le toroïde et les soudures finales ont été achevées en mars 2006.

Un des secteurs de la ligne de distribution cryogénique, avant la mise en place des écrans thermiques. Au centre de l'assemblage, on aperçoit les conduites d'hélium ainsi que les busbars (liaisons supraconductrices entre les amenées de courant et le bobinage).

Mise en fonctionnement du toroïde central

Le toroïde a été pour la première fois refroidi à -269° C dans son ensemble en juin et juillet 2006, avant d'être mis progressivement en fonctionnement à partir du mois de septembre.

Un courant de 21 000 ampères a été injecté dans la nuit du jeudi 9 novembre 2006 dans les 8 bobines de l'aimant d'Atlas, soit 500 ampères de plus que le courant nécessaire pour produire le champ magnétique prévu. Tous les tests de fonctionnement ont été passés avec succès pour ce qui constitue désormais le plus grand



Évolution de la position verticale d'une bobine située en haut du toroïde, en fonction du courant électrique.

aimant supraconducteur au monde. Une fois sous tension, cet aimant stocke une énergie magnétique de 1,1 GJ, équivalente à celle nécessaire pour soulever la tour Eiffel d'une hauteur de 10 mètres.

Lors de la montée du courant, une déformation progressive de l'étoile formée par les bobines vers une forme ovale, d'une amplitude de 2 mm, a pu être observée. Cette amplitude est en bon accord avec les modèles utilisés pour le calcul des déformations mécaniques.

Collaborations

La collaboration avec l'industrie européenne s'est imposée pour fabriquer le toroïde. C'est ainsi que le Dapnia a travaillé avec Technicatome pour la France, ASG-Superconductors pour l'Italie, Leipert et EAS pour l'Allemagne, Corus et Exotech pour les Pays-Bas, HTS pour la Suisse, FCM pour l'Espagne, RusAl en Russie et MZOR en Bielorussie.

Seule la coopération très étroite entre les services du Dapnia (Service de physique des particules, Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme, Service d'ingénierie des systèmes, Service d'électronique, des détecteurs et d'informatique) a permis le succès de ce projet. Cette réussite constitue l'aboutissement de plus de 10 ans d'effort dans le cadre d'une collaboration mondiale. Elle est une étape décisive vers la mise en service du détecteur Atlas au Cern, avant la prise de données prévue fin 2007.

Le solénoïde supraconducteur pour le détecteur CMS

Au travers d'un accord de collaboration avec le Cern signé en 1996, le Dapnia est impliqué dans la conception générale, la réalisation et les essais du solénoïde supraconducteur de l'expérience CMS (*Compact muons solenoid*), devant être installé au Cern sur le collisionneur LHC (*Large hadron collider*). Au sein du Dapnia, le SACM intervient comme service pilote du projet pour les aspects de conception magnétique et thermique, pour la supervision de l'assemblage et les essais en surface au Cern, assisté du Service d'ingénierie des systèmes pour les aspects de la conception mécanique, du suivi de la réalisation dans l'industrie et de l'instrumentation. Outre sa taille et son énergie magnétique stockée, les particularités de ce solénoïde sont le conducteur renforcé par un alliage d'aluminium (concept proposé par Saclay) et la conception du bobinage en cinq modules de quatre couches de conducteur chacun, bobinées à l'intérieur d'un cylindre servant de support. Les années 2004 à 2006 ont vu la fin de la réalisation industrielle des éléments individuels du solénoïde, la fin des tests, à Saclay, à basse température des éléments les plus critiques, l'assemblage final de l'aimant dans un hall de surface au Cern, ainsi que la mise en place de certains éléments du détecteur testés en même temps que l'aimant, et les tests cryogéniques et magnétiques complets de l'aimant jusqu'à ses caractéristiques nominales.

Qualification à Saclay d'éléments critiques

À la suite des amenées de courant qui avaient été testées à Saclay dans des conditions cryogéniques et électriques très représentatives de leur fonctionnement dans l'aimant, le cryostat vertical de 8 m de profondeur fut utilisé pour tester les 30 tirants de suspension de la bobine dans l'enceinte à vide : 4 tirants verticaux et 8 tirants radiaux, d'environ 1,9 m de long, 16 tirants longitudinaux de 5,5 m de long, en deux longueurs égales. Tous les tirants furent testés dans les conditions cryogéniques réelles, c'est-à-dire avec une extrémité vers 20 K et l'autre à 300 K, à des valeurs allant jusqu'à 110 % de leur charge de travail maximale. Tous les tirants passèrent ce test de réception sans problème.

Le séparateur de phases, élément essentiel du fonctionnement de la cryogénie de proximité en mode thermosiphon, fut testé, d'abord seul puis connecté à une longue boucle simulant le circuit de l'aimant. Ces essais permirent, d'une part, de vérifier le bon fonctionnement du séparateur de phases, et, d'autre part, de mieux comprendre le fonctionnement thermo-hydraulique de ce mode de refroidissement.

Test du séparateur de phases à Saclay relié à une boucle cryogénique reproduisant le fonctionnement de l'aimant en mode thermosiphon.

Mise en place du 3e module de la bobine sur la plate-forme de montage au Cern (photo Cern).

Montage de la masse froide au Cern

Conçu au Dapnia, le scénario d'assemblage du solénoïde s'est concrétisé, dès 2001, par l'arrivée au Cern et suivie de ses tests à blanc de la plateforme de montage, puis par l'arrivée du 1er module de la bobine en février 2004. Les cinq modules qui constituent l'ensemble de la bobine furent livrés sur une période d'environ un an, jusqu'en janvier 2005, et empilés successivement en position verticale autour de l'enceinte à vide interne, supportant aussi les écrans thermiques internes. Puis, après la mise en place des écrans thermiques externes, l'ensemble fut basculé en position horizontale et introduit dans l'enceinte à vide externe, positionnée dans la culasse magnétique en août 2005.

Après la mise en place de la cheminée cryogénique, reliant le séparateur de phases à l'aimant et abritant tous les fils de mesure, et de la cheminée des amenées du courant, les fonds de l'enceinte à vide furent installés fin 2005, finalisant ainsi le montage de l'aimant.

Essais en surface au Cern

Dès la fermeture de l'enceinte à vide, le pompage fut lancé et la mise en froid de l'aimant commença début février 2006. Quatre semaines plus tard, l'aimant était à 4 K, et quelques tests à faible courant furent possibles. Il fallut cependant attendre fin juillet 2006 pour que tous les détecteurs devant être testés avec le champ magnétique soient installés dans l'aimant et la culasse magnétique fermée, avant de pouvoir monter le courant dans l'aimant de manière significative.

Les tests électriques de l'aimant eurent lieu en deux périodes.

- Fin juillet 2006 à fin août 2006 : montée progressive jusqu'au champ nominal, avec une vérification systématique du bon fonctionnement des systèmes de contrôle et de sécurité. Le champ nominal de 4 T au centre de l'aimant (pour un courant de 19 141 A) fut atteint le 28 août 2006. Pendant ces essais, l'aimant se comporta parfaitement. Seuls deux systèmes auxiliaires (un clapet magnétique et un mesureur de courant) posèrent quelques problèmes.

- Octobre 2006 : mesure du champ magnétique dans l'aimant pour différentes valeurs de champ et affinage des réglages pour le fonctionnement de

L'enceinte à vide extérieure positionnée dans la culasse magnétique (en rouge) est glissée autour de la masse froide. En jaune, la plateforme permettant le montage de la bobine et son basculement de la position verticale à la position horizontale (photo Cern).

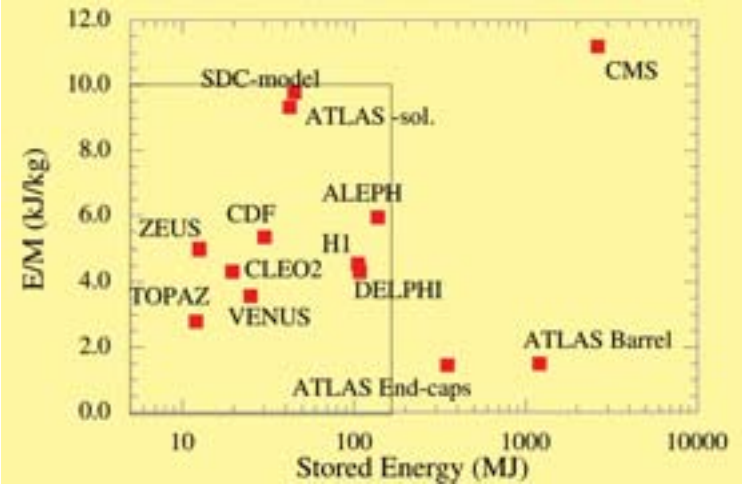
L'aimant est prêt pour être refroidi. La cheminée des amenées de courant est visible en haut à gauche (photo Cern).

longue durée.

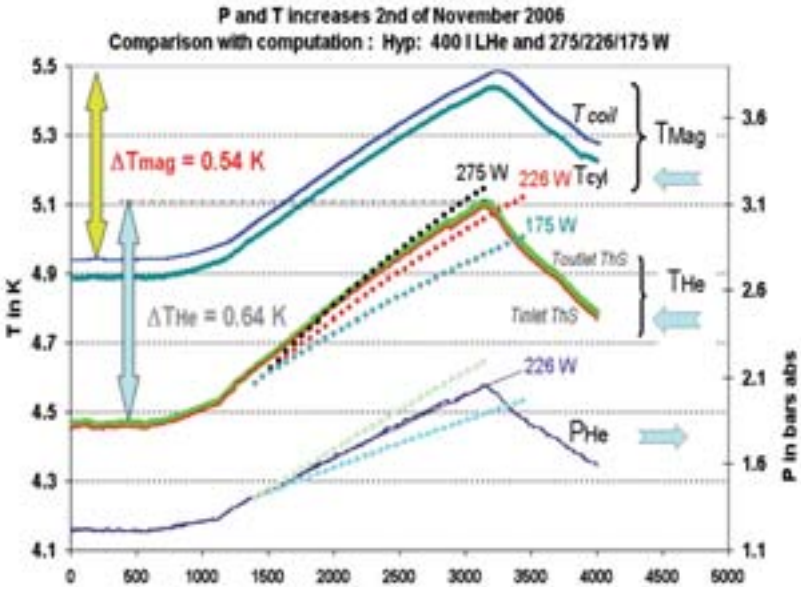
Ces essais se terminèrent par un test de stabilité thermique partiel, par élévation de la température de l'aimant en pressurisant le circuit de refroidissement. Une élévation de 0,5 K par rapport à la température normale de fonctionnement n'eut aucun effet sur l'aimant. L'aimant passa donc avec succès tous les tests prévus.

Pendant ces essais, la contribution de Saclay porta essentiellement sur le suivi des températures, des contraintes et des déplacements de la masse froide, sur le contrôle des amenées du courant et sur l'analyse du système de protection, en particulier, en cas de décharge rapide de l'aimant ; pendant tous les essais, l'aimant ne transita jamais naturellement, mais l'activation volontaire d'une décharge rapide entraîna la transition de l'aimant par l'effet des courants induits dans les cylindres supportant le bobinage (effet de quench-back).

À partir de début novembre 2006, l'aimant fut réchauffé en faisant circuler un courant dans le bobinage. Le réchauffage jusqu'à la température ambiante fut effectif fin novembre. En parallèle, la culasse magnétique de l'aimant commença à être démontée et transférée dans la caverne. À la fin du mois de décembre 2006, quatre des quinze gros ensembles constituant le détecteur ont été descendus en caverne.



Parmi les aimants supraconducteurs testés, CMS est celui qui a la plus grande énergie stockée totale et la plus grande énergie par unité de masse de bobine.



Montée en température de l'aimant par pressurisation de l'hélium servant à son refroidissement. L'évolution de la température permet aussi d'estimer les pertes thermiques.

Le solénoïde Clas pour l'expérience DVCS

Dans le cadre des collaborations entre le Dapnia et le Laboratoire Jefferson aux États-Unis, le SACM a étudié et réalisé, en collaboration avec le Service de physique nucléaire et le Service d'ingénierie des systèmes, un solénoïde supraconducteur pour le détecteur Clas (*Cebaf* large acceptance spectrometer*) destiné aux études de diffusion Compton profonde virtuelle (DVCS). La première campagne d'expérience de physique DVCS a débuté en mars 2005 à Newport News en Virginie.

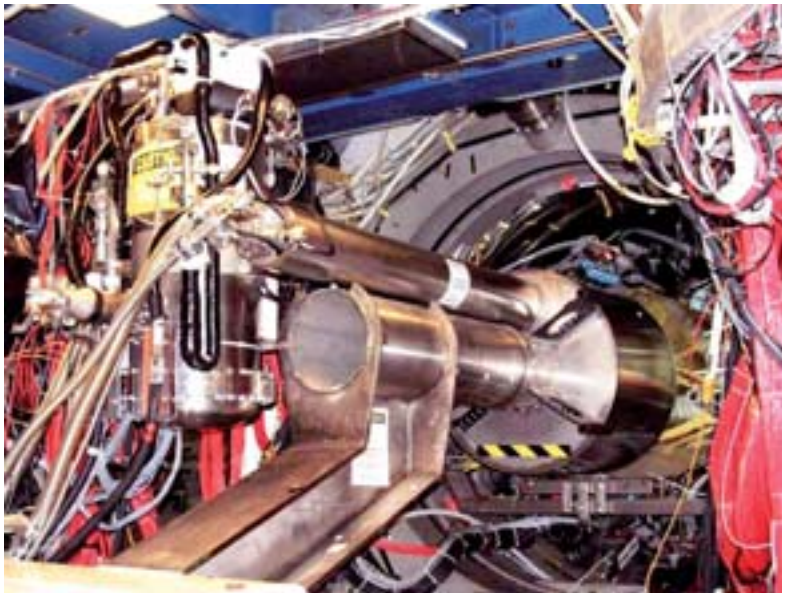
Tests de l'aimant à Saclay en décembre 2004.
Les caractéristiques principales de l'aimant sont :
Un champ au centre de 4,65 T dans une ouverture de 230 mm de diamètre.
Un champ extérieur à l'enceinte à vide inférieur à 3 10^{-3} T à partir du diamètre externe de 912 mm.
Le courant nominal est de 650 A et l'aimant fonctionne en hélium liquide à 4,2 K.

L'aimant supraconducteur fonctionne au centre du champ magnétique créé par les six aimants du toroïde Clas. Afin de limiter les forces d'interaction entre le toroïde et le solénoïde, nous avons utilisé la technique du blindage actif. Une deuxième bobine solénoïdale placée autour de la bobine principale annule le champ à la périphérie de l'ensemble. Les deux solénoïdes avaient été bobinés en 2003. Ils ont été assemblés puis intégrés dans le cryostat durant l'année 2004.

Le cryostat a nécessité un montage mécanique complexe pour satisfaire aux contraintes d'utilisation au centre de Clas et pour permettre le transport de l'aimant par voies aériennes et terrestres. L'aimant a été conçu sur mesure, avec un jeu externe de 10 mm par rapport au diamètre du détecteur. L'interface cryogénique est déportée de 2 m à l'arrière de l'aimant. Enfin, la configuration du site a également imposé une cryogénie horizontale qui fonctionne en convection naturelle sans organe de régulation froid ni automate.

L'ensemble terminé a été testé à Saclay en décembre 2004. Il a été expédié aux États-Unis en janvier 2005. Nous avons installé l'aimant au Laboratoire Jefferson (JLab) en février 2005, où il a passé avec succès tous les tests de sécurité et de mise en service jusqu'à débuter les expériences de physique le 1er mars. L'aimant Clas-DVCS a ouvert de nouvelles opportunités au centre du détecteur Clas. Il a été rapidement adopté par la communauté scientifique du JLab qui l'utilise pour d'autres expériences que le DVCS. Une deuxième campagne de mesure DVCS est en cours de programmation pour le début de l'année 2008.

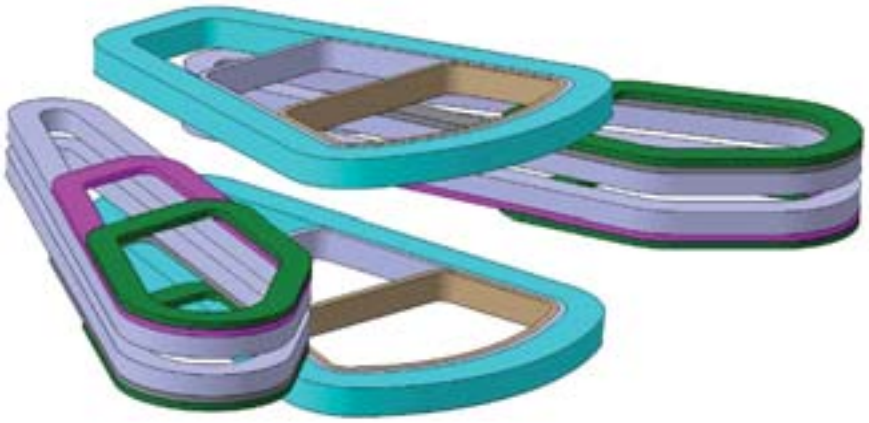
* Cebaf est le *Continuous Electron Beam Accelerator Facilitie*



L'aimant à l'entrée du détecteur Clas en septembre 2005. À gauche, le satellite cryogénique abritant la distribution de l'hélium et les amenées de courant électrique.

Le dipôle supraconducteur R3B – Glad

La collaboration européenne R3B (*Reactions with relativistic radioactive beams of exotic nuclei*), regroupant 50 instituts de 19 pays, met en place auprès du laboratoire GSI de Darmstadt en Allemagne un programme consacré à la physique émergente des noyaux exotiques aux énergies relativistes qui nécessite la construction d'installations expérimentales aux performances accrues : réactions en cinématique inverse, détection intégrale des produits de réaction et résolution. Au sein de l'ensemble de détection, le spectromètre supraconducteur de grande acceptance Glad (*GSI large acceptance dipole*) jouera un rôle central. L'avant-projet a été étudié dans le cadre du 5e programme-cadre de recherche et développement européen (5e PCRD). La décision de financer la construction de l'aimant R3B-Glad a été prise en octobre 2005, au titre du 6e PCRD.



La géométrie des 6 bobines supraconductrices en doubles galettes épouse l'acceptance conique du faisceau afin de minimiser le champ de fuite et l'énergie stockée, tout en fournissant un champ de déviation magnétique suffisamment homogène pour assurer la résolution en impulsion requise.

Spécifications du spectromètre

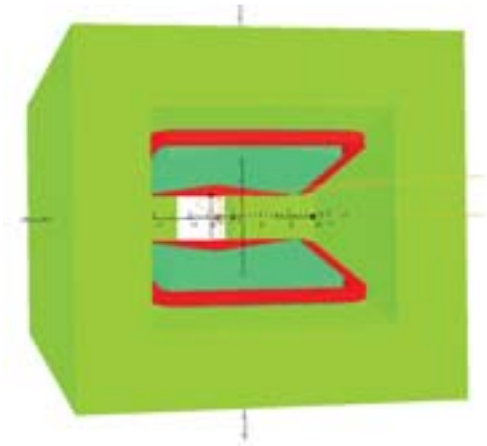
Analysant les particules issues des réactions entre le faisceau d'ions radioactifs et la cible secondaire, le dipôle Glad devra prendre en compte de nombreuses contraintes dont :

- une intégrale de champ de 4,8 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 40° les protons ;
- une grande ouverture angulaire, horizontale comme verticale (± 80 mrd), 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, jusqu'à l'énergie de 1 GeV par nucléon ;
- un champ de fuite négligeable (< 20 mT), en particulier autour de la zone de la cible située 1 m en amont de la face d'entrée de l'aimant ;
- une résolution de 10^{-3} en impulsion et de 1 mrad en angles reconstruits à la cible.

Conception de l'aimant

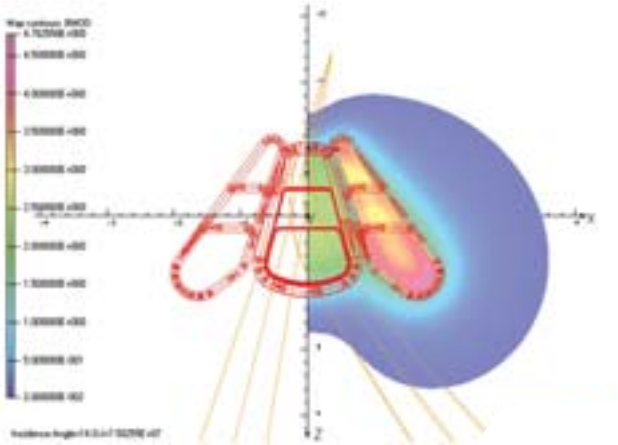
L'étude de conception réalisée entre 2001 et 2003 avait abouti à un aimant de configuration magnétique en blindage actif au design innovant, le Tigra trace (*Tilted and graded trapezoidal racetracks*) ou design "papillon", nom suggéré par la forme des six bobines supraconductrices constituant le dipôle.

La comparaison avec un design plus rustique a été demandée et réalisée en 2004-2005. Cependant les solutions en bobines circulaires ont abouti à un aimant plus complexe (10 bobines), tandis que la solution avec un blindage en fer s'est avéré lourd (supérieur à 300 tonnes), coûteux, et sans avantage décisif quant à la résolution en impulsion et au champ de fuite exigés.

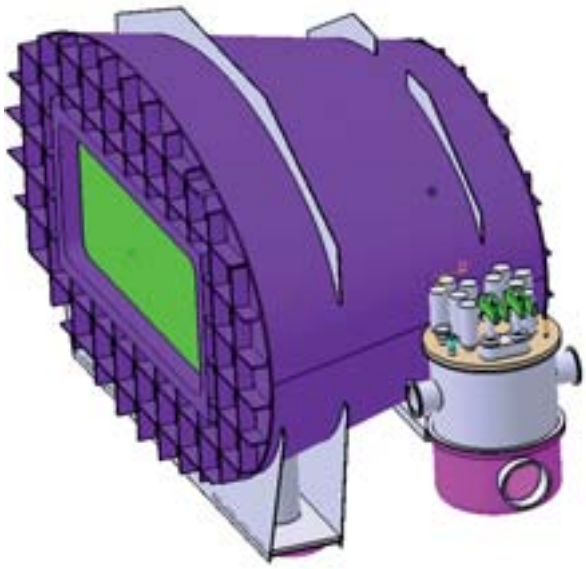


Solution non retenue : aimant super-ferrique (bobines supraconductrices en rouge autour de pôles dessinés pour produire une carte de champ homogène). En vert clair : le blindage en fer.

Le nouveau contrat européen, CNI Dirac (*Construction of new infrastructure – Darmstadt ion research and antiproton center*) du 6e PCRD qui financera le projet sur 2006-2010, a donc retenu la conception initiale dite en papillon. Les bobines planes en forme d'hippodrome sont placées au plus près du faisceau pour mieux épouser la grande acceptance conique requise. Afin de réaliser un blindage actif et un champ principal homogène, elles sont trapézoïdales et leur nombre de spires est graduel longitudinalement ; ceci assure une déviation magnétique constante dans le volume de champ intense utile. L'énergie stockée est ainsi minimisée, tout comme le champ de fuite dans la zone de la cible devant l'aimant.



La frontière de la demi-carte de champ magnétique montre la limite du champ de fuite à 20 mT. La gradation du nombre d'ampères-tours participe à l'obtention d'un champ dipolaire vertical homogène dans le volume utile pour le faisceau analysé. En orange, les trajectoires des protons et des neutrons issus de la cible.

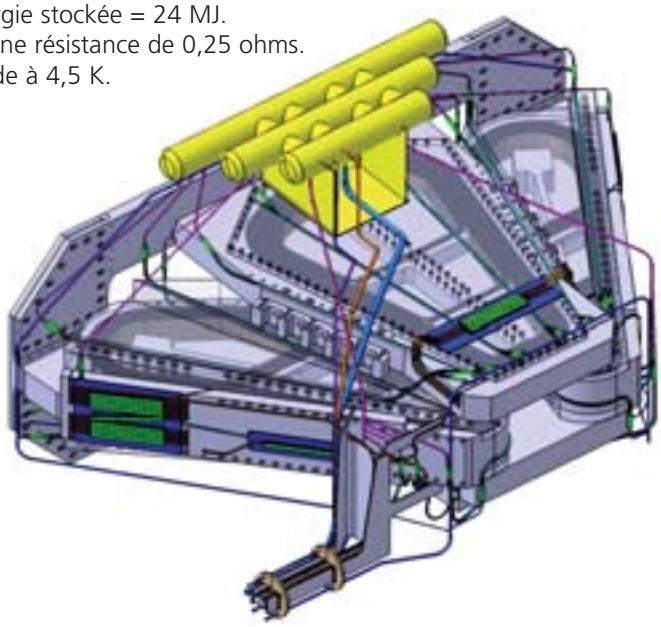


Cryostat en forme de cône elliptique entre deux plaques d'extrémité renforcées. Le satellite cryogénique (en premier plan) contient les vannes et les amenées de courant électrique.

En 2006, les propositions pour relever les défis techniques posés par cet aimant supraconducteur, concernant en particulier la reprise des efforts magnétiques intenses (300 à 400 tonnes par mètre), le refroidissement à 4,5 K par un thermosiphon en hélium liquide, l'instrumentation et le système de protection pour la sécurité de l'aimant, ont été présentées lors de la revue de conception technique. Enfin les 5 tonnes, soit 16 km, de câble supraconducteur en niobium-titane de type Rutherford ont été commandés fin 2006.

Quelques chiffres et spécificités de cet aimant "papillon"

6 bobines en doubles galettes de câble Rutherford en NbTi, en forme d'hippodrome trapézoïdal incliné.
Blindage actif (sans fer). Champ de fuite = 20 mT à 0,3 m du cryostat.
Densité de courant dans les bobines = 80 A/mm^2. Champ sur le conducteur < 6,5 T. Courant = 3700 A.
Intégrale de champ = 4,8 Tm. Champ central = 2,4 T. Énergie stockée = 24 MJ.
Protection en cas de quenchs par décharge externe dans une résistance de 0,25 ohms.
Refroidissement indirect par thermosiphon en hélium liquide à 4,5 K.
Forces magnétiques = 300 à 400 tonnes par mètre.
Masse totale de l'aimant avec son cryostat = 50 tonnes.
Dimensions hors tout : L 3,5 m x H 3,8 m x l 6,6 m.



La masse froide de l'aimant comprendra les 6 boîtes à bobines avec leurs liaisons et leurs supports mécaniques, ainsi que les tubes de refroidissement indirect et les jonctions entre les câbles supraconducteurs (ici en vert). En jaune figure le réservoir d'hélium liquide à 4,5 K alimentant le thermosiphon de refroidissement.

Le solénoïde pour l'expérience Compass

L'un des objectifs de l'expérience Compass, située sur le *Super proton synchrotron* (SPS) au Cern, porte sur l'étude de l'origine du spin du nucléon. Cette expérience utilise une cible polarisée dans le champ magnétique de 2,5 teslas qui est produit au centre de l'aimant supraconducteur Compass. La conception et la réalisation de cet aimant ont été complètement reprises après une première fabrication qui n'a pas permis d'obtenir les caractéristiques demandées.
Le Dapnia, à travers le Service de physique nucléaire (SPhN), le Service d'ingénierie des systèmes (SIS) et le SACM, a joué un rôle très important dans cette reprise du projet. Finalement, un aimant répondant aux caractéristiques demandées a pu être opérationnel pour la physique à partir de mi 2006.

Après une première tentative infructueuse de réalisation de son aimant supraconducteur, la collaboration Compass a mandaté un comité d'experts pour revoir la conception et suivre la réalisation d'un nouvel aimant permettant d'obtenir les caractéristiques demandées.

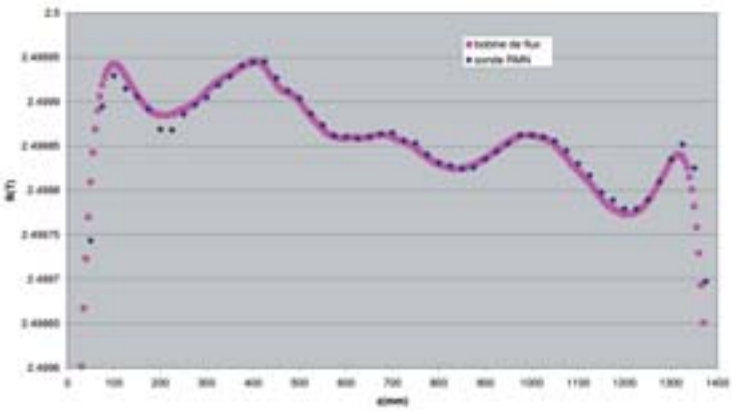
Le SACM a été très impliqué dans cette nouvelle phase :

- participation au comité d'experts,
- suivi de la réalisation industrielle de l'aimant,
- réalisation des tests de réception à Saclay, puis au Cern, incluant en particulier des campagnes de mesures magnétiques pour obtenir l'homogénéité du champ magnétique.

L'aimant a atteint son fonctionnement nominal sans transition, malgré l'apparition d'un court circuit dans un des enroulements de correction. La présence de ce court-circuit a obligé à complexifier le fonctionnement de l'aimant en programmant une montée de courant ajustée à cette situation particulière.

En collaboration avec le SIS, le SACM a réalisé avec succès deux campagnes de mesures magnétiques sur cet aimant. Une première série de mesures a eu lieu à Saclay fin 2005 pour caractériser l'aimant et réaliser une première homogénéisation du champ. En 2006, une deuxième série de mesures a été effectuée au Cern pour tenir compte de l'environnement magnétique, et en particulier de la présence du dipôle SM1 à proximité. Cette nouvelle caractérisation du profil magnétique du solénoïde principal et de celui des bobines de correction a permis de déterminer un jeu de courants pour améliorer l'uniformité du champ magnétique du solénoïde seul. Une inhomogénéité inférieure à 10^{-4} a été obtenue dans la zone utile (cylindre de 1,3 m de longueur et de 3 cm de diamètre), valeur conforme à la demande des physiciens.

Installation de l'aimant au laboratoire de mesures magnétiques du SACM.



Allure de l'induction magnétique sur l'axe du solénoïde après correction.

Les tests des bobines du stellarator Wendelstein 7-X

Le projet W7-X est un projet de l'Institut de physique du plasma de Garching (Allemagne) qui a la responsabilité de la réalisation d'une des machines de recherche du programme européen de fusion thermonucléaire par confinement magnétique. Cette machine, appelée stellarator Wendelstein 7-X, a un diamètre de l'ordre de 15 mètres pour une masse de 550 tonnes et est constituée de 70 aimants supraconducteurs destinés au confinement du plasma. Le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme a en charge les tests de réception des 70 aimants qui sont fabriqués en Allemagne, en Italie et en Angleterre, avant leur installation définitive sur le stellarator construit à Greifswald en Allemagne.

Principaux tests

Les tests permettent d'étudier le comportement électrique, thermique et hydraulique de chaque aimant aux températures ambiantes et cryogéniques. Pour obtenir le rythme de tests de 2 aimants par mois, une station d'essais comportant deux cryostats, pouvant recevoir chacun deux aimants, a été conçue, réalisée et qualifiée à Saclay dans les années 2000. Les tests sont programmés sur une durée de 5 ans à partir de 2004.

Mise en place d'une bobine supraconductrice non plane dans un des deux cryostats de la station d'essais W7-X.

À la température ambiante, quatre postes permettent de réaliser les principaux tests suivants :

- test d'isolement de la bobine par rapport à la boîte à bobine (10,4 kV),
- test d'isolement couche à couche (1600 V AC, 2 kHz),
- test d'isolement des capteurs par rapport à la masse (50 V).

À la température cryogénique, les deux cryostats permettent d'effectuer les principaux tests suivants :

- contrôle de la perte de charge de chaque circuit des aimants,
- montée de l'aimant au courant nominal (≈ 17 600 A) puis contrôle de la marge entre le fonctionnement nominal de l'aimant et le fonctionnement critique pour lequel l'aimant perd son état supraconducteur,
- transition de chaque bobine par augmentation de la température (incrément de 0,1 K toutes les heures).

Bilan des tests des aimants

Depuis début 2004, les 2 cryostats de la station d'essais sont opérationnels. Nous avons réalisé 40 tests en courant, validé 16 aimants dont 11 aimants de géométrie planes et 5 aimants non plans.

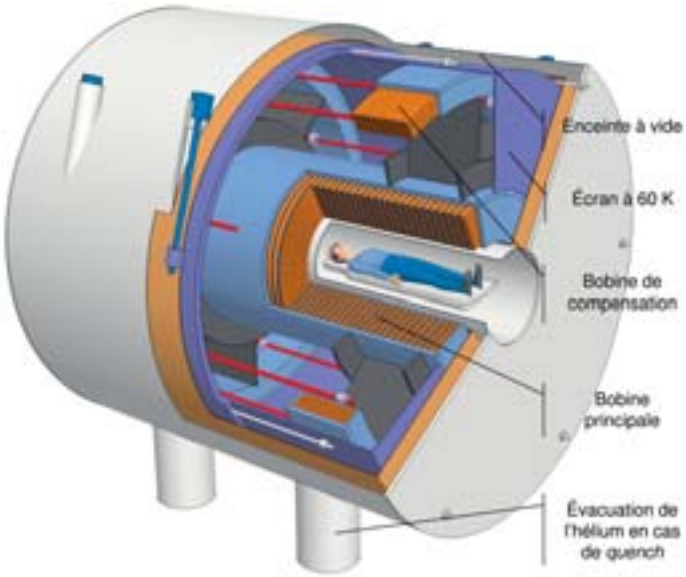
Ces différents tests ont permis de mettre en évidence :

- des fuites sur les circuits hélium de refroidissement des boîtes à bobines des aimants plans,
- des fuites d'hélium sur les jonctions électriques des doubles couches de certains aimants plans,
- une isolation électrique insuffisante de certaines jonctions électriques des doubles couches des aimants non plans,
- des câbles de protection de *quench* des aimants ne supportant pas des tensions d'isolement de 10 kV.

À ce jour, les aimants présentant des problèmes ont été modifiés et réparés mais doivent être à nouveau testés. La fabrication des nouveaux aimants intègre les modifications techniques répondant aux différents problèmes que nous avons rencontrés lors des tests. La cadence de production des aimants augmentant, notre rythme de tests devrait atteindre 20 aimants par an pour les 2 années à venir.

Le projet Iseult pour la plate-forme Neurospin

La Direction des sciences du vivant du CEA a lancé le projet Neurospin qui consiste en un centre de neuro-imagerie et de spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN). Destinée à repousser les limites de l'imagerie cérébrale, cette plate-forme technique, inaugurée le 24 novembre 2006 dans l'enceinte du CEA Saclay, est déjà équipée de deux systèmes produisant des champs magnétiques de 3 T et de 7 T pour des études cliniques sur l'homme. Fin 2007, un système de 17 T, destiné à des études pré-cliniques sur le primate et le petit animal, sera aussi mis en route. Enfin le Dapnia participe, dans le cadre du projet franco-allemand Iseult, à la réalisation d'un aimant de 11,75 T corps entier qui devrait être installé à Neurospin en 2011. Cet aimant est un projet ambitieux qui permettra de dépasser les frontières technologiques actuelles.



Coupe longitudinale de principe de l'aimant Iseult. L'aimant générera en son centre un champ magnétique d'une intensité de 11,75 T – plus de 230 000 fois le champ magnétique terrestre – dans un volume de plusieurs m³ (une ouverture utile de 90 cm de diamètre permettant le passage du corps entier d'un patient). Ce sera lors de sa mise en service en 2011 une première mondiale.

Contexte du projet Neurospin

La technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil de diagnostic et de recherche pour les neurosciences. Dans ce contexte, le projet Neurospin vise à développer un centre comprenant à terme 4 imageurs : deux imageurs de 3 T et 7 T (Siemens) pour la recherche clinique, un imageur de 17 T à petite ouverture (Bruker) pour la recherche pré-clinique et enfin un imageur de 11,75 T avec une ouverture de 900 mm (programme Iseult). Ce dernier à haut champ et grande ouverture n'existe pas sur le marché et fait l'objet d'un programme de recherche en collaboration avec la société Siemens. Dans ce contexte, le Dapnia a été sollicité pour développer et réaliser l'aimant supraconducteur de 11,75 T corps entier.

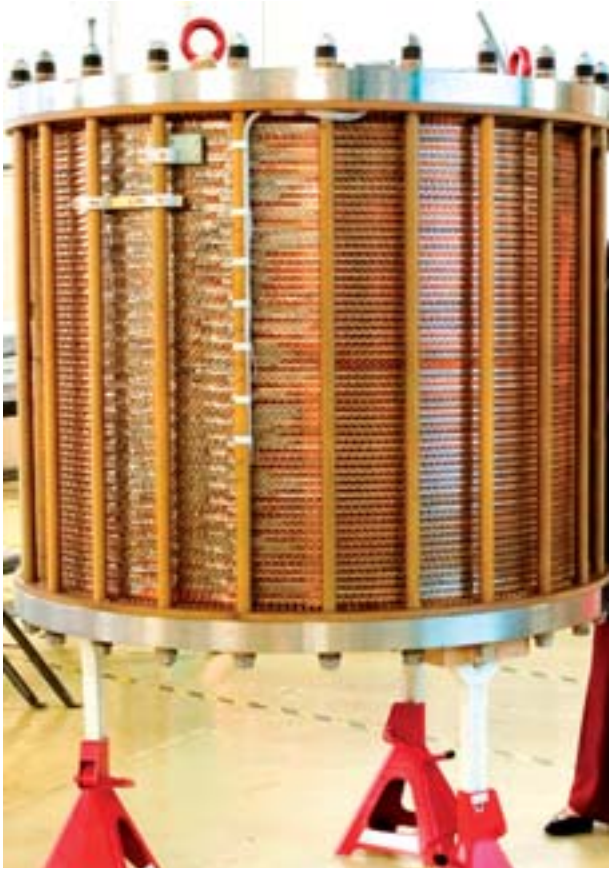
Collaboration Iseult

Un accord de collaboration a été signé en 2005 entre le CEA et Siemens pour le développement des techniques d'imagerie moléculaire à haut champ. Dans ce cadre et en lien avec les initiatives gouvernementales franco-allemandes pour l'innovation technologique, un programme baptisé Iseult a été mis en place avec Siemens et d'autres partenaires industriels et académiques, tels qu'Alstom et Guerbet en France. L'objectif de ce programme est de développer de nouveaux outils de diagnostics des maladies neurodégénératives, grâce à des techniques d'imagerie moléculaire novatrices basées sur l'utilisation de hauts champs magnétiques et de nouveaux agents de contrastes pharmaceutiques.

Spécificités de l'aimant supraconducteur à haut champ

Outre le fort champ magnétique dans un grand volume, nous devons résoudre 3 défis technologiques liés à des impératifs propres à l'IRM : le premier est d'obtenir un

Bobinage d'un conducteur pour test de courant critique.



Bobine en doubles galettes qui fournira un champ magnétique de 8 T dans un diamètre utile de 600 mm pour la future station d'essais Seht.

champ magnétique homogène à quelques millionièmes autour du cerveau du patient, le second est de stabiliser le champ le temps de l'examen à quelques dizaines de milliardièmes et le troisième enfin est d'arriver à confiner le champ à l'intérieur de la salle d'examen. Cela est obtenu grâce aux 45 tonnes du bobinage principal de l'aimant qui doit être positionné le plus précisément possible autour du cerveau (à quelques dixièmes de millimètre). Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils supraconducteurs en niobium-titane parcourus par un courant de 1400 A et bobinés en doubles galettes. Ce supraconducteur doit être maintenu à très basse température (1,8 K au-dessus du zéro absolu soit -271 °C). Pour cela les bobines sont baignées dans plusieurs milliers de litres d'hélium superfluide protégés de l'extérieur par une série d'enceintes, telle une gigantesque bouteille thermos. Le confinement du champ magnétique dans la salle d'examen est réalisé grâce à un bobinage qui génère un contre-champ et qui annule celui du bobinage principal à l'extérieur de l'aimant. Dans un système classique, il aurait fallu plusieurs milliers de tonnes de blindage en fer.

La conception de l'aimant comporte un certain nombre de caractéristiques qui le distingue des aimants classiques d'IRM. Du fait de la nouveauté des solutions proposées, un plan de développement spécifique est lancé dont l'objectif est de pouvoir tester tous les nouveaux concepts sur des prototypes afin de valider les solutions prises avant de passer à la phase de réalisation. Les principaux prototypes d'investigations sont :

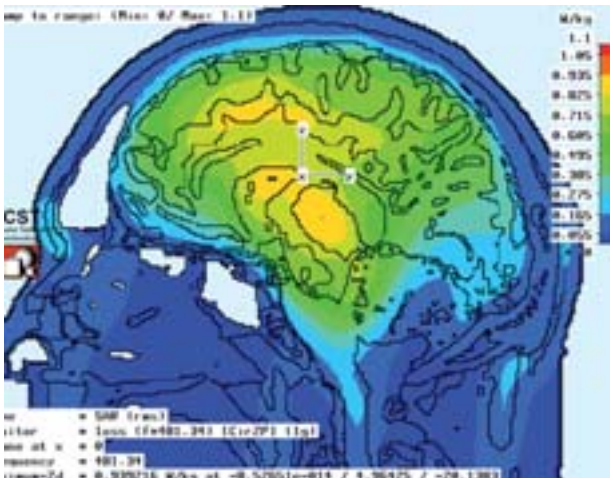
- une bobine modèle supraconductrice de petite taille pour tester les principes d'homogénéisation du champ magnétique à partir de blocs de doubles galettes de conception définitive à l'échelle 1,
- un prototype à échelle réduite pour l'étude des composants, des procédés de fabrication, des conditions de fonctionnement électromagnétique, thermique et thermohydraulique envisagés pour l'aimant final,
- un prototype réalisé à partir d'assemblage de 16 doubles galettes à l'échelle 1.

Station expérimentale Seht

Les tests de ces prototypes nécessitent la réalisation de stations de tests cryomagnétiques spécifiques. En particulier, la construction de la station d'essais nommée Seht (Station d'essais huit teslas) sera aussi l'occasion d'évaluer et de valider les développements faits sur la cryogénie à 1,8 K, le circuit d'alimentation électrique, le contrôle commande et la protection de l'aimant.

Antennes à haute fréquence

L'augmentation du champ magnétique implique celle de la fréquence du signal HF utilisé pour la production d'une image IRM. Un prototype d'antenne accordée à 500 MHz et des mesures SAR (*Specific absorption rate*) ont été réalisés en collaboration avec le Service d'électronique, des détecteurs et d'informatique. Parallèlement, le SAR induit dans les tissus humains a été simulé numériquement. La difficulté majeure identifiée est celle de satisfaire simultanément les exigences de moindre SAR et de moindre artefact de contraste de l'image en raison de l'interaction physique entre l'onde HF et les tissus.



Specific absorption ratio (SAR) calculé. La puissance RF déposée au niveau des tissus organiques, caractérisé par le SAR, doit se situer en deçà des seuils autorisés par la législation.

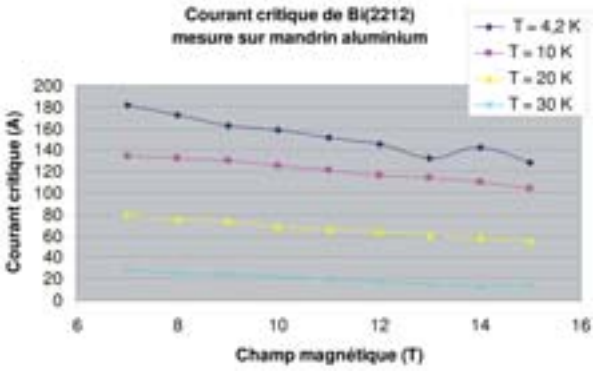
Contribution au projet Iter

Deux événements très importants ont marqué la période 2004-2006 en ce qui concerne le projet Iter : la décision, prise en juin 2005, de construire la machine de fusion Iter à Cadarache et la mise en place d'une « approche élargie » entre l'Europe et le Japon qui, en plus de la réalisation d'Iter, vise en particulier la construction de deux autres grands équipements dans le domaine de la fusion. Il s'agit du tokamak supraconducteur japonais JT60-SA et de l'accélérateur de haute intensité Ifmif, destiné à étudier l'effet des irradiations sur les matériaux qui seront utilisés dans les futurs réacteurs de fusion. La construction de cet accélérateur est précédée par celle d'un prototype, Ifmif-Eveda.

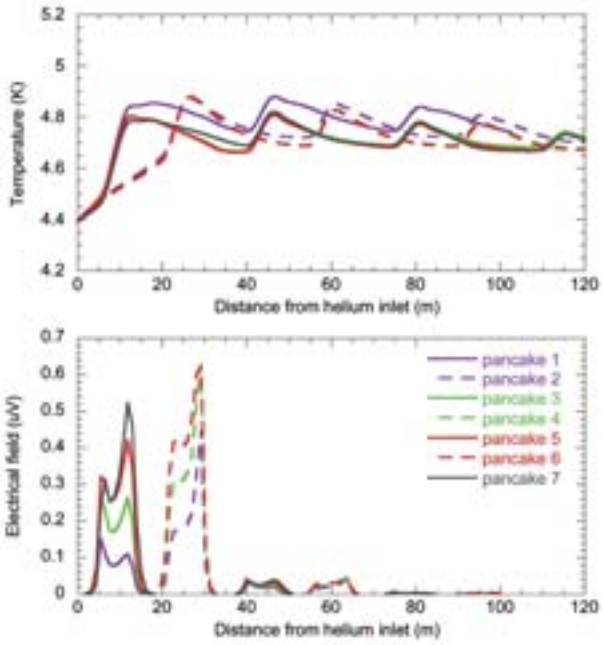
Pour l'ensemble de ces projets, le travail se fait entre les trois départements de la Direction des sciences de la matière impliqués dans la fusion : le Département de recherche sur la fusion contrôlée (DRFC/Step), le Département de recherche fondamentale sur la matière condensée (DRFMC/SBT), le Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée (Dapnia/SACM et SIS), au sein d'une structure de coordination spécifique, le comité de coordination des trois départements (CC3D).

L'activité technique 2004-2006 sur le projet Iter s'est fait essentiellement dans le cadre de réponses à des appels d'offres de l'*European fusion development agreement* (Efda). Le SACM s'est impliqué en particulier dans la conception d'un dipôle à haut champ pour une station d'essais des conducteurs d'Iter, la réalisation d'une maquette de bobinage avec une résine innovante, des études de thermo-hydraulique des bobines toroïdales d'Iter et de leurs circuits de refroidissement, des études de distribution de fluides cryogéniques et des caractéristiques de supraconducteur à haute température critique. Certaines de ces tâches sont terminées, d'autres sont en cours.

Parallèlement à cette activité technique, une activité organisationnelle définit les participations possibles du SACM aux projets Iter (dans la thématique de certaines tâches proposées par l'Efda) et JT60-SA. En particulier le SACM s'est positionné dans les essais à froid des bobines toroïdales.



Mesure du courant critique d'un brin supraconducteur à haute température critique rond en fonction du champ magnétique et de la température (tâche Efda HTSPer).



Évolution de la température et du champ électrique le long des trois premiers tours de chaque galette d'une bobine toroïdale à la fin de la combustion du plasma (tâche Efda THCoil). Les conducteurs sont des câbles en conduit en Nb_3Sn refroidis par circulation d'hélium supercritique ; le champ électrique est le résultat des distributions de champ magnétique, de contrainte et de température le long des conducteurs. Les simulations numériques sont faites avec le code Vincenta développé par l'institut Efremov en Russie.

En 2006 a eu lieu la mise en place préliminaire du projet Ifmif-Eveda, sur le plan technique, à partir des études antérieures et, sur le plan organisationnel, avec la répartition des tâches entre les partenaires et l'implantation de l'équipe internationale à Saclay. Plus de détails sur l'accélérateur Ifmif sont exposés dans la thématique sur les accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité.

Cryogénie

Cryogénie alternative pour les températures au-dessus de celle de l'hélium liquide

S'il est relativement facile d'envisager le refroidissement à température contrôlée et l'extraction de puissance avec de l'hélium en phase gazeuse, il est plus complexe d'ajuster ces deux paramètres pour obtenir un contrôle en température stable au centième de degré. Un premier pas avait été franchi avec la cible Clas il y a une dizaine d'années, mais il s'appuyait sur la condensation de gaz intermédiaires (hydrogène et deutérium) pour assurer le niveau de stabilité recherché.

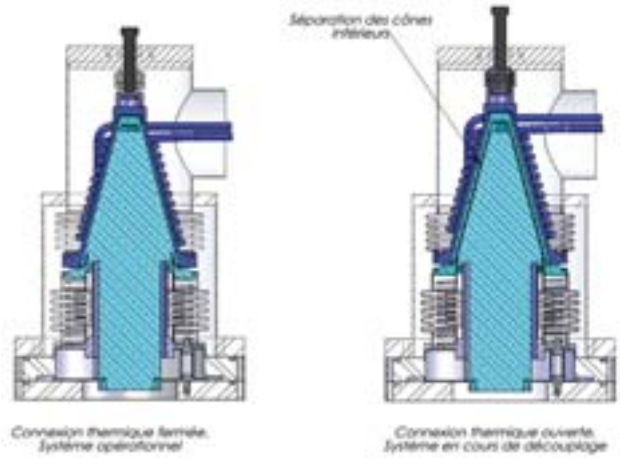
Dans le cadre des essais des supraconducteurs à haute température critique, nous avons étendu cette technique à la gamme de température allant de 5 à 80 kelvins pour des puissances de l'ordre de 1 à 10 watts sans fluide intermédiaire. La technique développée utilise 3 niveaux d'échangeurs, en série, pour affiner ces paramètres. Les principales applications concernées par ce procédé sont le cryostat de Mirim et le porte échantillon de la station d'essais Cétacé.

Dans le cadre du projet Agata, pour la physique nucléaire, il est nécessaire de refroidir 180 cristaux de germanium à la température de l'azote sans vibrations acoustiques. Ces cristaux sont regroupés par trois dans 60 cryostats. Hors les importantes quantités d'azote nécessaires pour absorber la puissance à extraire, les vibrations seront suffisamment bruyantes pendant le remplissage des cryostats pour nécessiter l'arrêt des mesures en cours.

En solution alternative, nous avons proposé de refroidir ces cristaux avec de l'hélium gazeux dont les qualités fluidiques devraient permettre un fonctionnement continu silencieux. Nous avons étudié une solution par thermosiphon en hélium gazeux entre les cristaux et un échangeur refroidi à l'azote liquide déporté suffisamment loin pour ne pas perturber le fonctionnement. Les études ont montré que ce système serait viable dans une gamme de pression de 5 à 15 bars à une température de 77 kelvins avec des écarts de température de l'ordre de la dizaine de kelvins.

La principale difficulté de cette technologie de détecteur demande de savoir désaccoupler à froid les cristaux du système de réfrigération. Nous avons, en conséquence, étudié un système d'accouplement thermique possédant un interrupteur qui permet d'isoler thermiquement les cristaux pendant cette opération.

Ces deux études cryogéniques sont importantes, car elles ouvrent la voie de l'utilisation thermique des supraconducteurs à haute température critique sur une très large gamme de température avec une assez grande souplesse d'utilisation.



Vue en coupe du système d'accouplement étudié pour Agata. L'interrupteur thermique est constitué de deux cônes emboîtés qui se rapprochent ou s'écartent en fonction du besoin. Quand l'interrupteur est fermé les cônes sont en contact et les interstices mécaniques sont comblés par de l'hélium gazeux. Quand il est ouvert, les cônes sont écartés de quelques millimètres et on assure un vide primaire dans le volume qui les sépare.

Vue 3-D du système d'accouplement étudié pour Agata en cours de désaccouplement. Le cône central, bleu marine, est isolé de l'extérieur par l'interrupteur thermique qui assure la protection aux rayonnements et la barrière de vide qui sont indispensables pour le maintenir à 80 kelvins.

Le cryostat de l'imageur Mirim

Le JWST (*James Webb space telescope*), futur successeur du HST (*Hubble space telescope*) à l'horizon 2013, est en cours de réalisation par la Nasa en partenariat avec le Canada et l'Europe par l'intermédiaire de l'ESA (*European space agency*). Dans le cadre de ce programme, le Service d'astrophysique a la charge de la réalisation et des essais de l'instrument de détection Mirim (*Mid infra-red imager*) qui travaille dans la gamme de l'infrarouge moyen (5 à 27 µm) pour l'observation de la formation et de l'évolution des galaxies et des systèmes planétaires lointains.

Le SACM a étudié et spécifié la réalisation du cryostat du banc d'essais de cet imageur. Il est destiné à refroidir à très basse température (5 à 20 K) l'ensemble de l'instrument, c'est-à-dire la structure opto-mécanique et le détecteur infrarouge. Les températures seront régulées indépendamment avec une précision de ± 0,1K pour la structure optique et de ± 0,01 K pour le détecteur lui-même dans les conditions nominales. Des rampes de mise en froid et de réchauffage d'environ 10 kelvins par heure sont nécessaires afin de limiter les contraintes liées aux rétreints et aux dilatations thermiques lors de ces phases.

Pour des raisons de stabilité, une réfrigération à partir d'hélium liquide a été décidée ; on utilise alors la chaleur sensible du gaz pour maintenir la température désirée.

L'ensemble Mirim sera positionné au sein d'un système d'écrans thermiques à 4,2 K directement lié à un réservoir de 100 litres d'hélium liquide. Un second écran à 70 K refroidi par circulation d'hélium gazeux permettra de limiter les apports radiatifs sur le premier. Cet ensemble est placé dans une enceinte à vide en acier inoxydable afin de stopper les apports de chaleur par convection et conduction dans l'air.

Deux circuits d'échangeurs en hélium permettent de contrôler la température souhaitée du détecteur et de la structure opto-mécanique. La régulation de ces températures est réalisée en contrôlant les débits d'hélium dans les deux circuits et est ajustée plus finement par des petits éléments chauffants placés sur les échangeurs de chaleur. Un système de remplissage automatique permet de maintenir le niveau d'hélium liquide dans le réservoir afin de rester en froid durant les périodes d'essais.

Cryostat monté sur la table optique par l'intermédiaire d'un hexapode.

La cible à hydrogène Spaladin

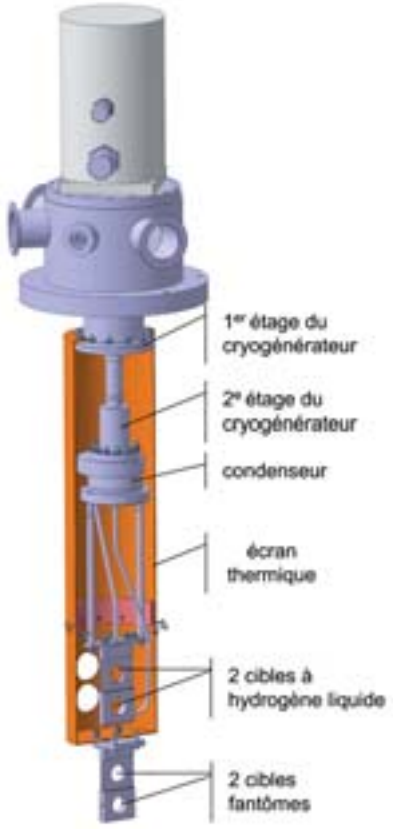
Une nouvelle cible d'hydrogène liquide va être mise en place, au centre de recherche GSI près de Darmstadt en Allemagne, dans le cadre du programme de spallation qui étudie les interactions entre des ions lourds et des protons. Cette cible doit réduire au maximum les interactions parasites à la fois dans les parois de la cible et dans la cible elle-même.

Les expériences comme Spaladin choisissent d'accélérer des noyaux lourds sous forme d'ions, et de les faire interagir sur des noyaux d'hydrogène pour obtenir une réaction de spallation. L'hydrogène, sous forme liquide, est contenu dans une cible sur laquelle vient frapper le faisceau d'ions lourds. Les réactions parasites entre les ions lourds et les matériaux de l'enceinte contenant l'hydrogène - les fenêtres - doivent être limitées au maximum. Les physiciens ont choisi de réduire l'épaisseur de la cible et des fenêtres, tout en gardant un taux d'interaction suffisant.

Les équipes du Dapnia ont mis au point une nouvelle cible d'hydrogène liquide de 3 mm d'épaisseur délimitée par des fenêtres ultra-minces réalisées en mylar aluminisé de 6 microns d'épaisseur et de 25 mm de diamètre. La cible est sous vide, ce qui impose de travailler avec une pression d'hydrogène très faible de 150 hPa qui correspond à une température de 15,2 K. La conception du système de remplissage et de vidange de la cible est originale. Le volume tampon qui contient le gaz est déformable ce qui permet le maintien de cette différence de pression, quel que soit l'état du système (mise sous vide initiale, liquéfaction, exploitation, retour à la pression atmosphérique).

Pour piloter cette nouvelle cible, un système de contrôle électronique et informatique permet de gérer le mouvement de translation du cryostat afin d'amener sur l'axe du faisceau les différentes cibles : deux cibles "liquides" et deux cibles « fantômes" fixées sur la partie inférieure de l'écran thermique ; une position "vide" est également prévue. Ce système assure la régulation de la température du cryogénérateur avec une stabilité de 0,01 K. Enfin, il prend en charge la gestion des alarmes et la mise en sécurité de l'installation en cas de défauts constatés (vide, pression d'hydrogène, perte de la régulation de température, rupture d'une fenêtre).

La nouvelle cible servira dans les deux prochaines expériences Spaladin qui ont été acceptées par le comité de recommandation scientifique de GSI, et plus tard dans le cadre du projet R3B (*Reactions with relativistic radioactive beams of exotic nuclei*) sur la future machine Fair.



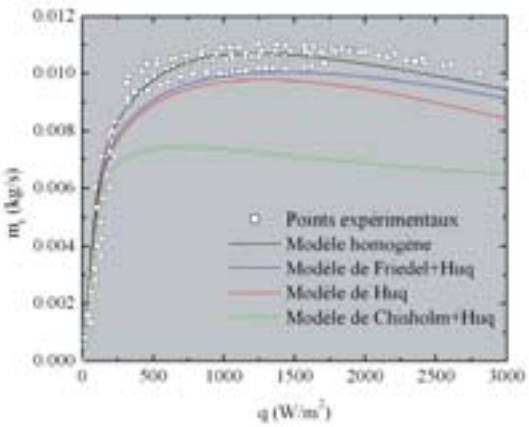
Les cibles à hydrogène liquide pour l'expérience Spaladin.

Cryostat des cibles, en arrière plan, et réserves de gaz d'hydrogène en premier plan.

Circulation naturelle d'hélium diphasique

Ce travail, essentiellement expérimental, permet d'étudier les différents paramètres d'une boucle d'hélium en circulation naturelle tels que les débits massiques, les différences de température entre une paroi et le fluide, les variations de pression de l'écoulement, les coefficients de transfert thermique et les flux critiques. Il fait partie des études du système de refroidissement de l'aimant supraconducteur du *Compact Muon Solenoid* (CMS), détecteur en construction au Cern pour le *Large Hadron Collider* (LHC).

Les paramètres hydrauliques que sont le débit massique total et la variation de pression peuvent être modélisés par un modèle simple, le modèle homogène, où les propriétés, comme la masse volumique des deux phases, sont homogénéisées. La justesse du modèle homogène s'explique principalement par le fait que la différence des propriétés physiques des deux phases est faible. En effet, le rapport des masses volumiques du liquide et du gaz à 4,2 K n'est que de 6, alors qu'il vaut 1000 pour l'eau, et celui des viscosités est de 3. Ce modèle a permis de valider la simulation numérique prédisant les régimes d'écoulement dans l'aimant de CMS.

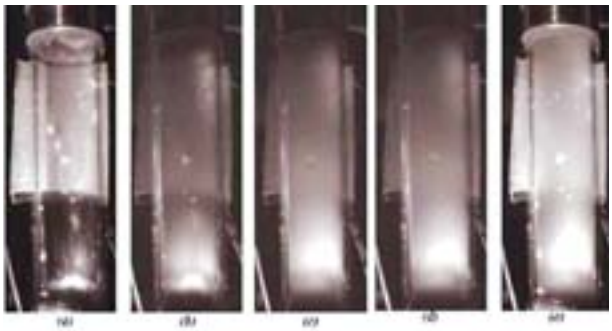


Débit massique total en fonction du flux de chaleur dans un tube de 14 mm de diamètre. Le débit total est mesuré par un débitmètre venturi. Différents modèles ont été testés et comparés aux résultats expérimentaux : le modèle homogène donne le résultat le plus juste.

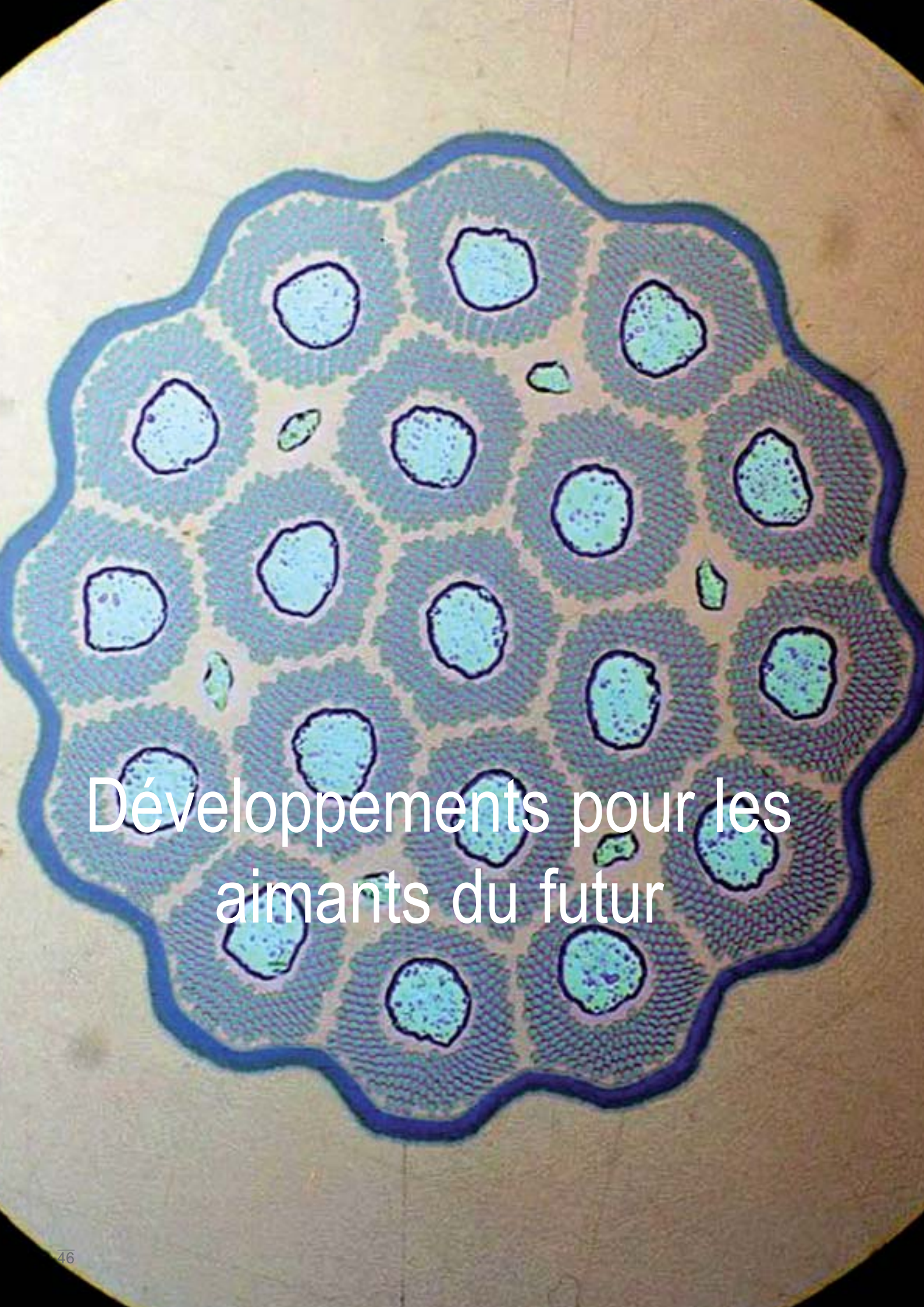
Les propriétés thermiques de l'écoulement, notamment les coefficients d'échange pariétaux, intéressent aussi les constructeurs d'aimants. On retrouve, à faibles flux de chaleur, un régime dominé par la convection forcée et, à forts flux de chaleur, un régime dominé par l'ébullition nucléée. Les corrélations de différents auteurs ont été comparées aux résultats expérimentaux. Une corrélation développée au SACM présente une meilleure justesse et prédit les résultats à 15 % environ.

Finalement, ce que nous connaissons le moins est la structure de l'écoulement, à savoir la répartition géométrique des deux phases dans l'écoulement. L'environnement cryogénique et le choix d'être non intrusif rendent la réalisation d'un système de visualisation difficile. Le système de visualisation utilisé est composé d'un tube en verre collé sur un soufflet et d'une caméra CCD classique. Ce dispositif a permis de faire les premières visualisations d'un tel écoulement. Les premiers résultats sont encourageants même si des problèmes de netteté n'ont pas été résolus. L'apparition des bulles est bien visible mais il nous est difficile de conclure sur le régime d'écoulement (à bulles, bulles agglomérées, poches disloquées…). Des travaux sont prévus pour améliorer le système.

Dispositif de visualisation. Le tube en verre est connecté au tube d'étude par collage à un soufflet et par des joints métalliques. La caméra CCD, en visée directe, est maintenue à 80 K. Le système d'illumination est composé de systèmes externes (ampoules halogènes et classiques) et d'un système interne de fibre optique.



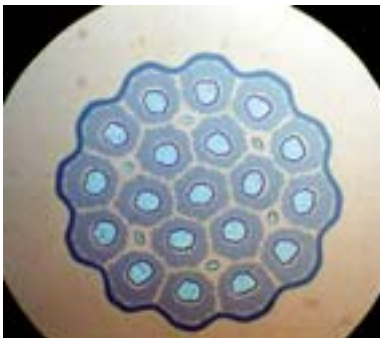
Visualisation de l'écoulement en fonction du flux de chaleur. a) 0 W/m², b) 100 W/m², c) 1000 W/m², d) 2000 W/m², e) 3000 W/m².



Développements pour les aimants du futur

Quadripôle modèle en niobium-étain

L'objectif du projet est la conception, la construction et le test à froid d'un prototype d'aimant quadripolaire en niobium-étain (Nb_3Sn) basé sur la conception des aimants quadripolaires du LHC, réalisés en niobium-titane (NbTi). Le composé supraconducteur Nb_3Sn a une température critique et un champ critique qui sont à peu près le double de ceux du NbTi. Cependant, il présente les inconvénients de nécessiter pour sa formation un traitement thermique à haute température (supérieure à 600°C) et d'être ensuite très fragile, avec des paramètres critiques sensibles aux déformations. Il a fallu repenser la conception et la fabrication des bobines afin de limiter les risques de dégradation du conducteur.

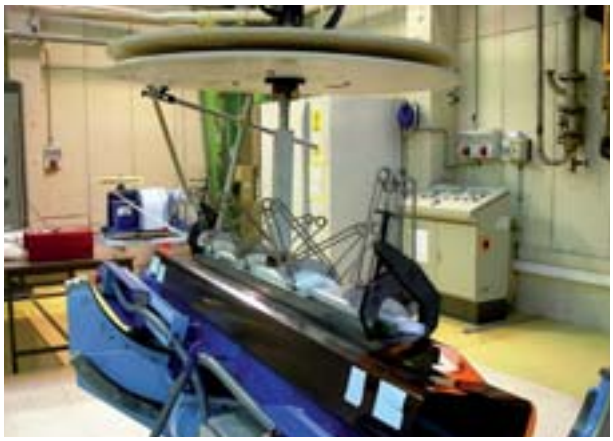


Section d'un fil en niobium-étain après traitement thermique (photo Alstom/MSA).

Le bobinage est réalisé à partir d'un conducteur non réagi, qui contient les précurseurs du composé Nb_3Sn, isolé à l'aide d'un ruban de fibres de verre. Une fois la mise en forme terminée, les bobines sont soumises à un traitement thermique à 660 °C pendant 240 heures pour permettre la formation du composé Nb_3Sn avec la bonne stœchiométrie. Après le traitement thermique, les bobines sont imprégnées sous vide avec de la résine époxy pour assurer leur cohésion mécanique et permettre leur manipulation sans risques d'endommagement pour le conducteur. Le temps nécessaire à la réalisation d'une bobine est d'environ deux mois.

La fabrication du conducteur en Nb_3Sn a fait l'objet d'un accord de collaboration avec Alstom/MSA qui s'est conclu en mars 2004 avec la livraison de 5 longueurs de 60 m de câble en Nb_3Sn, pour la réalisation de 4 bobines pour l'aimant modèle et d'une bobine de réserve. L'année 2004 a été consacrée à la validation des composants et des outillages de bobinage avec la réalisation d'une première bobine d'essai. La réalisation des outillages de réaction et d'imprégnation a été achevée dans le premier semestre 2005 ; la validation de ces outillages a été effectuée d'abord sur la première bobine d'essai, et ensuite sur une deuxième, terminée en décembre 2005.

La fabrication de la première bobine certifiée a démarré en décembre 2005. Six bobines certifiées ont été réalisées en 2006 (une en plus par rapport à ce qui avait été initialement prévu). Les tests électriques et mécaniques sur les bobines ont été réalisés chez l'industriel Accel, en Allemagne, en utilisant le matériel mis au point pour les quadripôles du LHC. Trois essais d'assemblage et frettage des bobines ont été réalisés sur des maquettes de 200 mm de hauteur, découpées dans les parties droites des deux pôles d'essai et représentatives de la section droite de l'aimant ; ces tests ont permis de valider les calculs mécaniques sur lesquels est basée la conception de l'aimant, ainsi que la procédure d'installation des capteurs de contrainte prévus pour suivre l'évolution des bobines pendant la fabrication et les tests de l'aimant.



Bobinage d'un pôle en Nb_3Sn au bâtiment 122 du CEA Saclay.

L'assemblage de l'aimant, les premiers tests à chaud et la réalisation de la masse froide pour les tests à froid sont prévus pour le premier semestre 2007 ; les tests à froid vont suivre dans le deuxième semestre 2007.

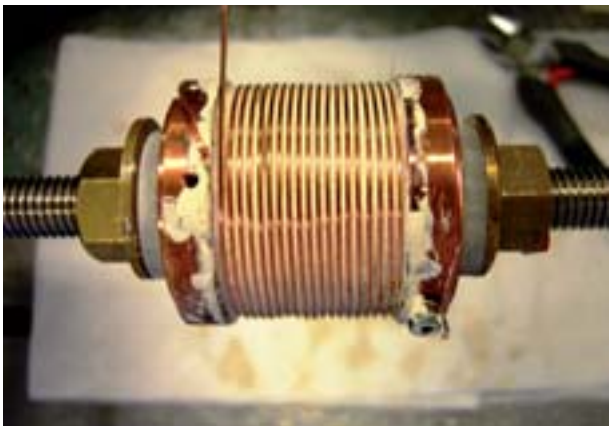
Essai de frettage chez l'industriel Accel, en Allemagne.

Développement d'une isolation en céramique

Le développement d'une isolation électrique en céramique a pour objectif l'étude et la mise en œuvre d'une isolation pouvant supporter le traitement thermique à haute température (600 à 700°C) nécessaire à la formation de certains supraconducteurs, en particulier le niobium-étain (Nb_3Sn). Les conducteurs sont guipés avec un ruban de fibre de verre enduit de précurseurs qui réagissent pendant le cycle thermique, formant l'isolation et assurant une tenue mécanique de la bobine. On supprime ainsi 2 étapes délicates de la fabrication : la manipulation de la bobine réagie, très fragile, pour la sortir du moule de réaction et l'insérer dans le moule d'imprégnation et l'étape d'imprégnation sous vide de cette bobine avec une résine époxy.

Les travaux réalisés dans le cadre d'une thèse ont permis de définir les caractéristiques de la solution d'imprégnation et ont montré que l'utilisation de cette isolation n'affectait pas les propriétés du brin en Nb_3Sn. Un solénoïde de petite dimension a été testé avec succès sous de forts champs magnétiques externes (12 T) dans la station Cétacé du service et a produit un champ propre de 3,8 T avec un courant de transport de 740 A.

Un second bobinage supraconducteur de 400 spires en Nb_3Sn (hauteur 54 mm, diamètre extérieur 72 mm) a été réalisé, puis testé dans la station d'essai Christiane pour évaluer la résistance mécanique de son isolation. Alimenté par un courant de 590 A, le démonstrateur a produit une induction de 5,6 T en son centre. En ajoutant le champ magnétique du démonstrateur et celui généré par l'aimant Christiane, on a obtenu une induction magnétique de 10 T au centre du système. Aucune dégradation n'a été observée dans la plage étudiée (30 MPa en traction, 60 MPa en compression), les transitions observées étant systématiquement liées aux performances intrinsèques du brin de Nb_3Sn utilisé.



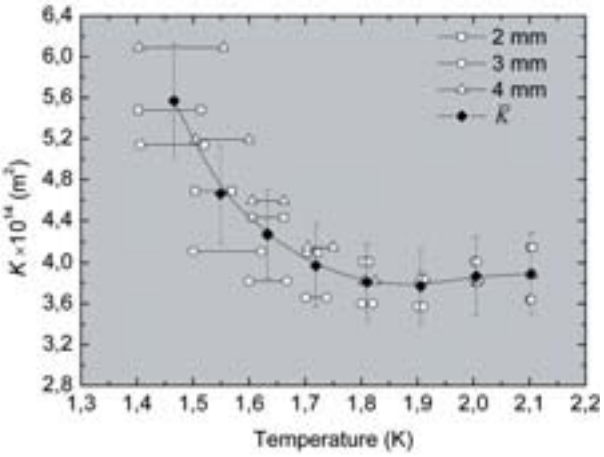
Bobine de fil en Nb_3Sn en cours de réalisation.

Transferts de chaleur en hélium superfluide à travers des milieux poreux

Pour les constructeurs d'aimants supraconducteurs, la compréhension des transferts de chaleur dans les bobinages est nécessaire pour les études de stabilité thermique. Pour les aimants refroidis par de l'hélium superfluide, comme les dipôles et les quadripôles du LHC par exemple, la résistance thermique créée par l'isolation électrique des câbles forme la principale barrière thermique au refroidissement. Avec l'émergence d'aimants à fort champ en Nb_3Sn, les concepteurs recherchent de nouveaux systèmes d'isolation composés de matériaux à base de céramique. Ces matériaux peuvent avoir une porosité plus faible que les isolations conventionnelles, ce qui devrait réduire d'autant le refroidissement par l'hélium.

Un système expérimental a été développé et permet l'étude des transferts de chaleur à travers des échantillons de référence. On trouve, dans ce type de milieux confinés, les deux régimes classiques de transferts de chaleur dans l'hélium superfluide que sont le régime de Landau à faibles flux de chaleur (régime sans vortex superfluides) et le régime de Gorter-Mellink à forts flux (régime avec vortex). En régime de Landau les mesures ont montré que l'on retrouve une loi de type milieu poreux (loi de Darcy) et que l'on peut extraire une perméabilité du matériau. Cette perméabilité, la capacité à laisser passer un fluide, est dépendante de la température puisque « l'écoulement » n'est pas isotherme.

Cette étude a aussi permis de mettre en évidence le concept de tortuosité en hélium superfluide : le chemin thermique ou dynamique dépend de la géométrie du



milieu poreux et non pas de l'épaisseur. En effet, à fort flux de chaleur, on se retrouve uniquement en régime de Gorter-Mellink où n'intervient pas la perméabilité mais uniquement la tortuosité et la section de passage des transferts de chaleur. La tortuosité extraite des résultats expérimentaux est indépendante de la température avec une variation de 10 %, ce qui est dans la barre d'erreur des mesures.

Perméabilité en fonction de la température pour des matériaux en Al_2O_3 d'épaisseurs différentes ayant une même porosité de 32 %. K est la valeur moyenne de la perméabilité pour les trois échantillons. Une déviation de 10 % de K est présentée et comparée avec la dispersion des résultats.

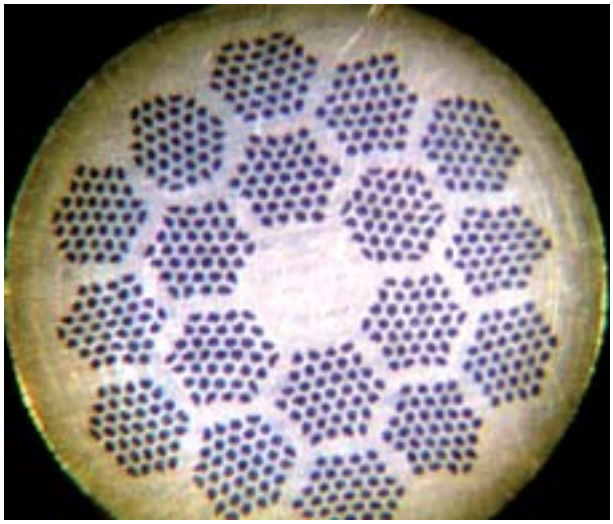
Utilisation des supraconducteurs à haute température critique

Les matériaux supraconducteurs à haute température de transition, depuis leur découverte par Bednorz et Muller en 1986, n'ont cessé de stimuler la curiosité des physiciens et des ingénieurs. Pour le SACM ces matériaux apportent des perspectives nouvelles. En effet, non seulement leur capacité à transporter un courant électrique intense à l'état supraconducteur est maintenue jusqu'à des températures supérieures à 60 K pour certains d'entre eux, mais surtout ils conservent leurs propriétés supraconductrices sous des inductions de 30 T, à condition d'être maintenus à la température de l'hélium liquide. Ils ouvrent ainsi la possibilité de réaliser des aimants supraconducteurs fonctionnant entre 30 et 40 K ou produisant des champs magnétiques de 30 T.

En parallèle de la modernisation des stations d'essais pour réaliser les tests de ces nouveaux supraconducteurs, le SACM a entrepris des développements avec un industriel pour la réalisation d'un brin rond pouvant être câblé, ainsi que la recherche d'applications requérant l'emploi de champs magnétiques supérieurs à 20 T.

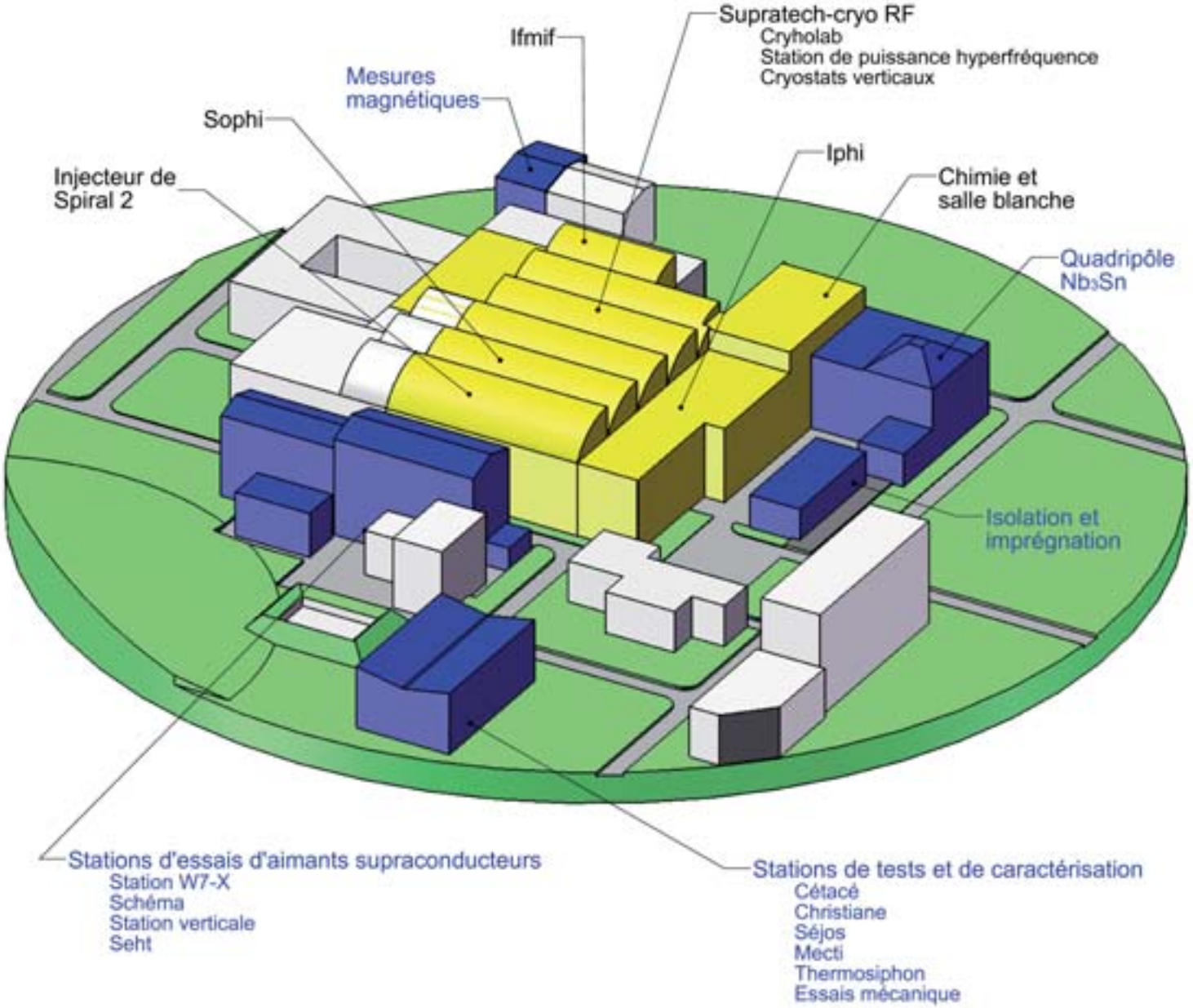
Les développements de conducteurs sont axés sur la mesure de performance des rubans existants, notamment dans la perspective d'une utilisation dans les tokamaks de fusion. Une étude commune avec le Département de recherche sur la fusion contrôlée de Cadarache s'attache à qualifier les composés supraconducteurs Bi2212 et à étudier les conséquences de leur utilisation dans le fonctionnement d'une machine telle que le démonstrateur de réacteur de fusion Démo.

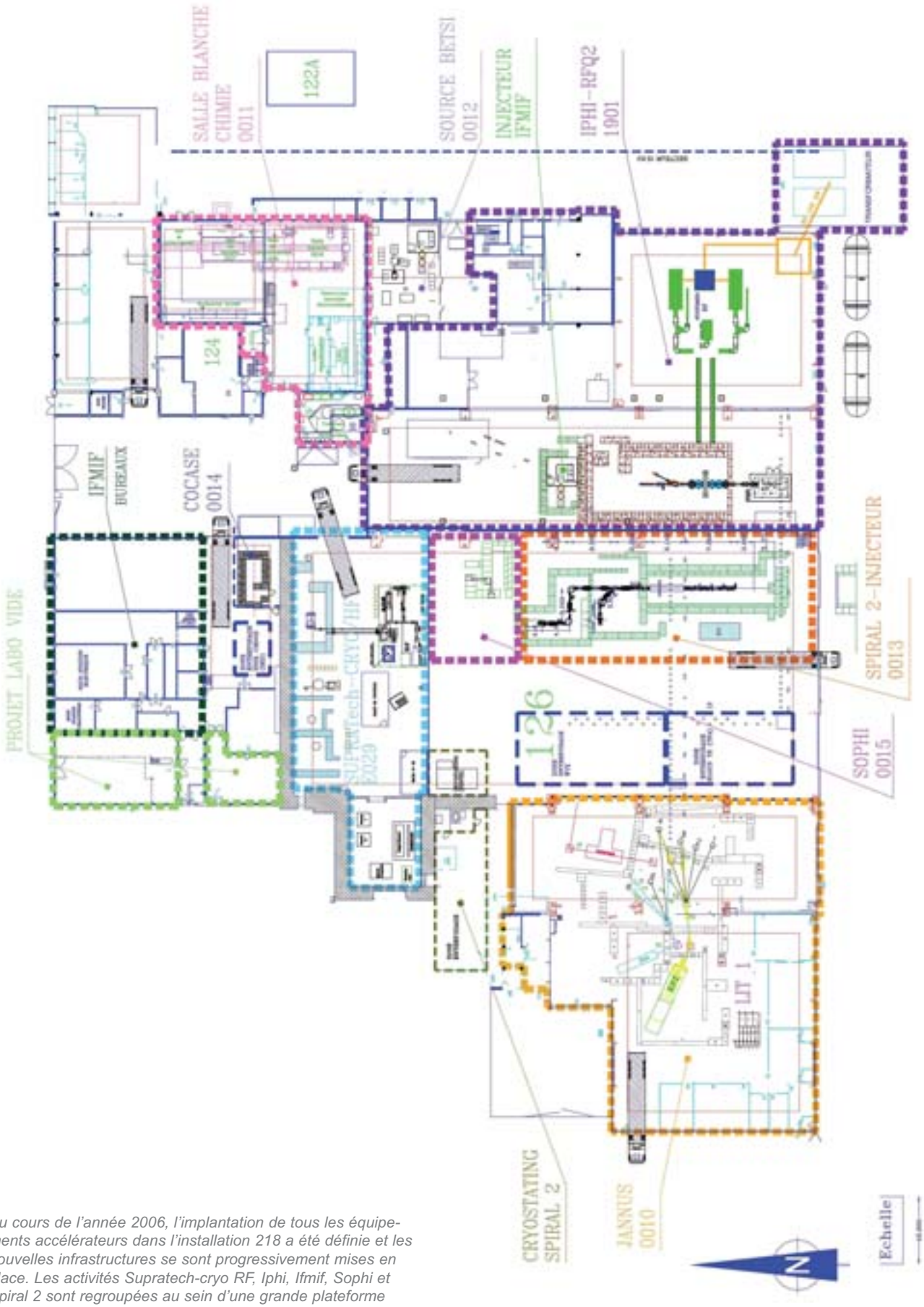
Les applications identifiées comme nécessitant des champs magnétiques supérieurs à 20 T sont la résonance magnétique nucléaire (RMN) à haut champ et la lévitation magnétique. La RMN à haut champ permet d'analyser la structure de molécules complexes ; on considère actuellement que 20% des structures moléculaires inconnues pourraient être décryptées avec des appareils fonctionnant à la fréquence de résonance du proton de 1 GHz, correspondant à un champ magnétique de 23,5 T. La lévitation magnétique permet de s'affranchir de la gravitation terrestre dans un milieu para ou dia-magnétique, et de recréer les conditions d'expériences embarquées sur les véhicules spatiaux. Cette technique permet notamment d'obtenir une meilleure pureté cristallographique dans la croissance de cristaux, d'étudier des anomalies dans les phénomènes de mouillabilité et des modifications des phénomènes d'auto organisation en biologie ou des modifications d'échanges thermiques en paroi.



Brin rond supraconducteur Bi2212 de diamètre 0,8 mm (photo Nexans).

Plateformes Accélérateurs et Cryomagnétisme





Au cours de l'année 2006, l'implantation de tous les équipements accélérateurs dans l'installation 218 a été définie et les nouvelles infrastructures se sont progressivement mises en place. Les activités Supratech-cryo RF, Iphi, Ifmif, Sophi et Spiral 2 sont regroupées au sein d'une grande plateforme accélérateurs.

Sécurité et protection de l'environnement

Le Service des accélérateurs, de cryogénie, et de magnétisme du Dapnia intègre dans ses activités les démarches environnementales (ISO 14001) et de maîtrise des risques déployées par le CEA Saclay. Le SACM regroupe deux périmètres de sécurité du site (installations n°82 et n°218). Ceux-ci représentent environ 32 000 m² pour 17 bâtiments et un effectif moyen de 140 salariés. Ils abritent 17 installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). L'équipe « sécurité-environnement » du service est composée d'un Chef d'installation (CI) titulaire, de deux suppléants, conseillés par deux Ingénieurs de sécurité d'installation (ISI) et deux Animateurs de sécurité (AS). En 2006, 11 visites de sécurité, 4 exercices de sécurité et 80 hommes jours de formation à la sécurité ont été réalisés au SACM. De plus, le périmètre certifié ISO14001 du SACM s'est élargi suite à l'audit de l'AFAQ, témoignant de la prise en compte accrue des exigences de protection de l'environnement. L'objectif est que tout le SACM soit certifié en 2009.

Installation n° 82

Le périmètre regroupe les laboratoires LCSE et Léas du SACM.

- 12 bâtiments
- 10 000 m²
- 67 salariés CEA (SACM, SIS)
- 9 ICPE
- 3 ELPI (Équipes locales de première intervention) composées de 22 personnes volontaires

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

Les années 2005-2006 sont notamment marquées par le transfert et le regroupement des activités de chimie (isolation et imprégnation) au sein d'un même bâtiment.

Compte tenu de la dispersion des bâtiments, dix chefs d'exploitation de bâtiment (titulaires et suppléants) y relayent l'équipe sécurité sur certaines de leurs missions.

Laboratoire d'isolation et d'imprégnation.

Installation n° 218

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

- 6 bâtiments
- 22 000 m²
- 70 salariés CEA (SACM, Sénac, SIS)
- 8 ICPE
- 2 ELPI composées de 17 personnes volontaires

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

En septembre 2006, le laboratoire de chimie de l'Orme des Merisiers a été rattaché à l'installation 218.

Le réaménagement des halls pour accueillir les nombreux projets de l'installation (Cryholab, Iphi, Ifmif, Sophi, Cocase, etc.) occasionnent des chantiers multiples et de grande envergure.

Hall en cours d'aménagement pour l'installation de Cryholab.

Crédits photos : CEA, sauf indication

Rédacteurs de la brochure : Bertrand BAUDOUY, Pierre-Yves BEAUVAIS, Pierre BOSLAND, Stéphane CHEL, Philippe CHESNY, Antoine DAEL, Guillaume DEVANZ, Romuald DUPERRIER, Maria DURANTE, Wilfrid FARABOLINI, Bernard GASTINEAU, Laurent GENINI, Jean-Marc GHELLER, Raphaël GOBIN, Bertrand HERVIEU, François KIRCHER, Olivier KUSTER, Chantal MEURIS, Olivier NAPOLY, Jacques PAYET, Lionel QUETTIER, Jean-Michel REY, Jean-Michel RIFFLET, Françoise RONDEAUX, Fabrice SIMON, Pierre VEDRINE, Bernard VISENTIN.

Réalisation : atefo

DSM-Dapnia-SACM
CEA-Saclay
F- 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
http://www-dapnia.cea.fr/sacm