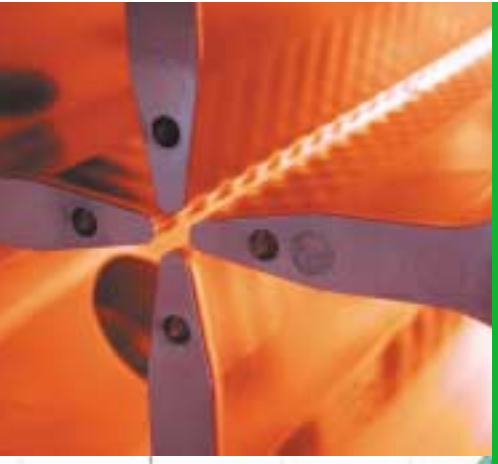
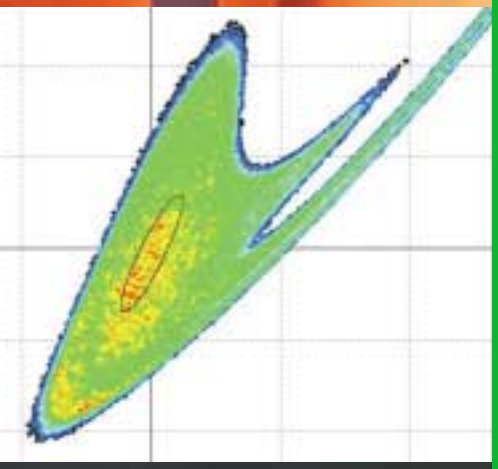




Direction des sciences de la matière

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

SACM

Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme

2001-2003

cea

Sommaire

Préface 1

Première partie

Les laboratoires 2

Les activités scientifiques et techniques des années 2001-2003

Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité **4**

Le projet Iphi 5

Le projet Spiral 2 9

Cavités supraconductrices pour Linac à protons 10

Collisionneurs linéaires d'électrons - positons et sources de lumière **12**

Le projet Tesla et l'accélérateur prototype TTF 13

Cavités supraconductrices pour machines à rayonnement synchrotron : cryomodules Soleil et Super-3HC 14

Les quadripôles et dipôles de l'anneau de stockage de Soleil 16

Développements pour les accélérateurs de particules **17**

Dynamique des faisceaux de particules 18

Développement de sources d'ions 21

R&D en supraconductivité radiofréquence 22

Instrumentation pour accélérateurs de particules 24

Électroaimants supraconducteurs pour la physique des particules et la physique nucléaire **26**

Les quadripôles supraconducteurs pour le collisionneur LHC 27

L'aimant toroïdal pour le détecteur Atlas 29

Le solénoïde supraconducteur pour le détecteur CMS 33

Le solénoïde pour le détecteur Clas de l'expérience DVCS 35

Le dipôle supraconducteur R3B-Glad 36

Électroaimants supraconducteurs pour les autres communautés scientifiques **38**

Les tests des bobines du stellarator Wendelstein 7-X 39

Le projet Neurospin 41

Développements pour les électroaimants du futur **42**

Développements pour aimants à fort champ magnétique 43

Thermohydraulique de l'hélium 45

Deuxième partie

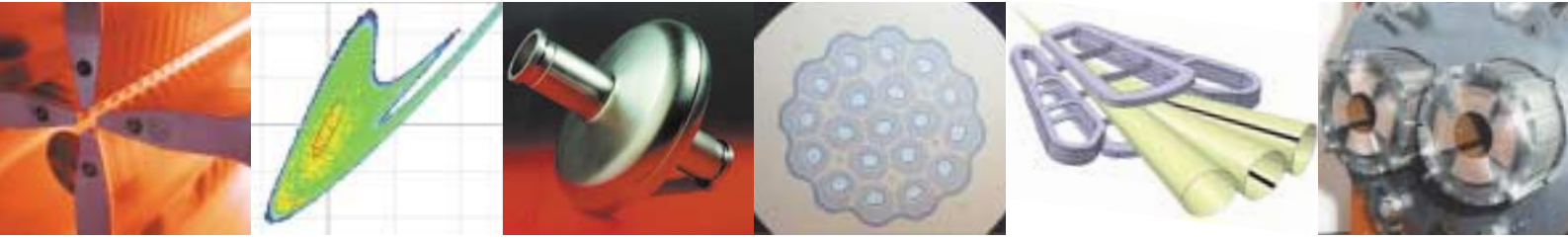
Les installations du service 47

Stations d'essais

Laboratoires et ateliers

Troisième partie

Informations générales **51**



Le Service des accélérateurs, de la cryogénie et du magnétisme

Le Service des accélérateurs, de la cryogénie et du magnétisme (SACM) assure le développement d'accélérateurs et d'aimants supraconducteurs et des technologies associées.

Il regroupe, en juin 2004, 66 ingénieurs et 58 techniciens. La vitalité du SACM repose aussi sur l'accueil de jeunes thésards et de visiteurs. Le personnel est réparti dans quatre laboratoires :

- *le Laboratoire d'études et de développements pour les accélérateurs (LEDA), spécialisé dans la conception générale des systèmes accélérateurs, la dynamique des faisceaux et la réalisation de sous-ensembles ;*
- *le Laboratoire d'études des structures accélératrices et des radiofréquences (LESAR) qui développe notamment des cavités supraconductrices et la technologie radiofréquence associée ;*
- *le Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs (LEAS), chargé de l'étude, de la réalisation et des tests d'électroaimants de grande taille ou de très haute performance (en champ magnétique ou en précision) pour les accélérateurs, les détecteurs et des applications diverses, notamment l'imagerie par résonance magnétique ;*
- *le Laboratoire cryogénie et stations d'essais (LCSE) en charge de la conduite des stations d'essais et des laboratoires de tests du service, de la R&D en cryogénie et de la production d'hélium liquide pour les besoins du département et de partenaires extérieurs.*

Le SACM répond en priorité aux besoins des programmes scientifiques du département et conduit des recherches et développements de nouvelles technologies pour offrir les instruments nécessaires au progrès de la recherche fondamentale. Il s'appuie sur les compétences des autres services du Dapnia. Une partie significative des activités concerne également l'extension des compétences du service aux besoins d'autres communautés scientifiques. Le SACM a aussi pour vocation d'assurer la conduite de projets de grande envergure et de développer les moyens d'essais correspondants. Enfin, de très nombreux projets conduisent à un transfert technologique à l'industrie.

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 2 K, pour les tests d'éléments supraconducteurs ou d'électroaimants jusqu'à 20000 A, de cavités accélératrices supraconductrices équipées de leurs coupleurs, 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 service participe à la conception et à la réalisation de sous-ensembles du Large Hadron Collider *(LHC) en construction au Cern. Ces dernières années ont vu le démarrage effectif de la production industrielle des masses froides des quadripôles supraconducteurs, l'achèvement de la première intégration des bobines du toroïde du détecteur Atlas et une avancée régulière de la réalisation du solénoïde du détecteur CMS. Il participe également à l'étude de plusieurs projets d'accélérateurs. Il s'est notamment illustré ces dernières années avec la mise en œuvre de deux cryomodules pour cavités harmoniques sur les sources de lumière SLS à Zurich et Elettra à Trieste et a démontré la faisabilité d'un injecteur de protons de haute intensité Iphi, tête d'un futur accélérateur de forte puissance aux usages multiples. Son savoir faire en développement d'accélérateurs et d'aimants supraconducteurs lui a permis de prendre une part importante dans l'avant projet détaillé de Spiral 2 et dans les nouvelles propositions de programmes européens de recherche et développement sur les accélérateurs dans le cadre du 6ème programme-cadre de recherche et de développement (6ème PCRD). Enfin, le SACM est aujourd'hui engagé dans le regroupement géographique du personnel et de la plupart de ses installations sur le site de Saclay.*

Dans les trois ans qui viennent, les efforts porteront d'abord sur l'achèvement des réalisations pour le LHC. Les développements pour des faisceaux intenses de protons ou d'ions radioactifs qui répondent aux besoins de nombreuses communautés scientifiques seront poursuivis. Le service contribuera fortement aux efforts européens et mondiaux sur les projets de collisionneurs e^+ e^-. Pour préparer l'avenir au-delà des projets en cours, le développement de la technologie des aimants supraconducteurs en niobium-étain est un axe majeur de R&D du service. Les tests des 70 bobines du stellarator W7X et les contributions au projet international de réacteur thermonucléaire Iter, la participation au futur centre de neuro-imagerie Neurospin et aux projets de sources de lumière de 4ème génération complètent un panorama ambitieux à l'image des réalisations passées du département. Ces projets nécessitent une très grande ouverture et de nombreux partenariats, tant avec d'autres unités du CEA et du CNRS qu'avec tous les grands laboratoires de physique des particules et de physique nucléaire, et avec de nombreux industriels.

Pascal Debu, chef du SACM

LEDA

Le **Laboratoire d'études et de développements pour les accélérateurs** (LEDA) regroupe les compétences du SACM concernant la conception et la réalisation de systèmes de production, de transport et d'accélération de faisceaux de particules. Ceci englobe la physique du transport des particules chargées dans les éléments magnétiques et radiofréquences, la réalisation et le fonctionnement de sources, d'injecteurs et de lignes de transport d'ions et d'électrons, ainsi que la conduite de projets.

Constitué, en juin 2004, de 16 ingénieurs, 8 techniciens et 3 étudiants en thèse, le LEDA 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 radiofréquences ;
- 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 œuvre 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.

Les faits marquants de ces dernières années ont été la remise en fonctionnement et l'optimisation de la source Silhi de protons et de deutons de haute intensité, 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 LEDA est engagé dans l'exploration des bases théoriques et des techniques de la prochaine génération d'accélérateurs de particules tels que les collisionneurs linéaires e^+e^-, les usines à neutrinos ou bien les sources de lumière de nouvelle génération.

Contact : napoly@dapnia.cea.fr

LESAR

Le **Laboratoire d'études des structures accélératrices et des radiofréquences** (LESAR) est chargé du développement des structures radiofréquences (RF) utilisées dans les accélérateurs de particules, en particulier de la technologie des cavités accélératrices supraconductrices. Ses principaux objectifs sont l'amélioration des performances des cavités supraconductrices au travers de la R&D en supraconductivité RF et le développement d'éléments RF innovants.

Les compétences spécifiques développées par les 15 ingénieurs et les 15 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. Le laboratoire dispose de plusieurs bancs de tests RF chauds ainsi que des cryostats d'essai de cavités supraconductrices, en particulier Cryholab qui permet de les tester dans un environnement du type accélérateur. Cette activité inclut le réglage des cavités et des autres composants RF, ainsi que la conception de l'électronique et la régulation RF.
- l'étude du comportement des cavités supraconductrices en fonction des traitements de surface accompagnée de mesures sur différents matériaux supraconducteurs. Pour cela le laboratoire bénéficie de plusieurs équipements remarquables : un laboratoire de chimie, une salle blanche de classe 100, un banc de dépôt PVD (*physical vapor de position*).

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

- l'obtention d'un champ de 40 MV/m sur une cavité supraconductrice ayant subi un traitement chimique conventionnel, et d'un champ record de 42 MV/m par électropolissage (collaboration Saclay/Desy/Cern),
- la mise en œuvre sur les sites de l'Institut Paul Scherrer à Zurich et Elettra à Trieste de deux cryomodules pour cavités harmoniques,
- la qualification sur faisceau du cryomodule prototype Soleil.

Contact : schel@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** (LEAS) est constitué, en juin 2004, de 19 ingénieurs, 8 techniciens, 3 thésards et un apprenti. Les équipes du laboratoire assurent la conception et la maîtrise d'oeuvre d'électroaimants 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 LEAS 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 LEAS 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 LCSE. Les mesures nécessaires couvrent les analyses des essais à température ambiante et cryogénique avec, entre autres, les analyses de *quench* et les mesures magnétiques.

Ces dernières années ont été essentiellement marquées par le passage de la phase de fin d'études à celle des réalisations pour le collisionneur LHC (*Large hadron collider*) du Cern avec une importante participation, à Saclay, au Cern et dans l'industrie européenne, aux détecteurs Atlas et CMS.

Pour rester compétitif, le LEAS 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 porte actuellement sur l'utilisation du Nb_3Sn et pourrait, dans les années à venir, concerner l'utilisation des nouveaux matériaux supraconducteurs.

Contact : rifflet@dapnia.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 I à ébullition ou supercritique, l'hélium II, 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 principaux utilisateurs sont les grands accélérateurs tels le Cern, GSI, Hera, TJNAF, Ganil ou 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 I, la thermo-hydraulique des thermosiphons et les transferts thermiques dans l'hélium II et les milieux poreux.

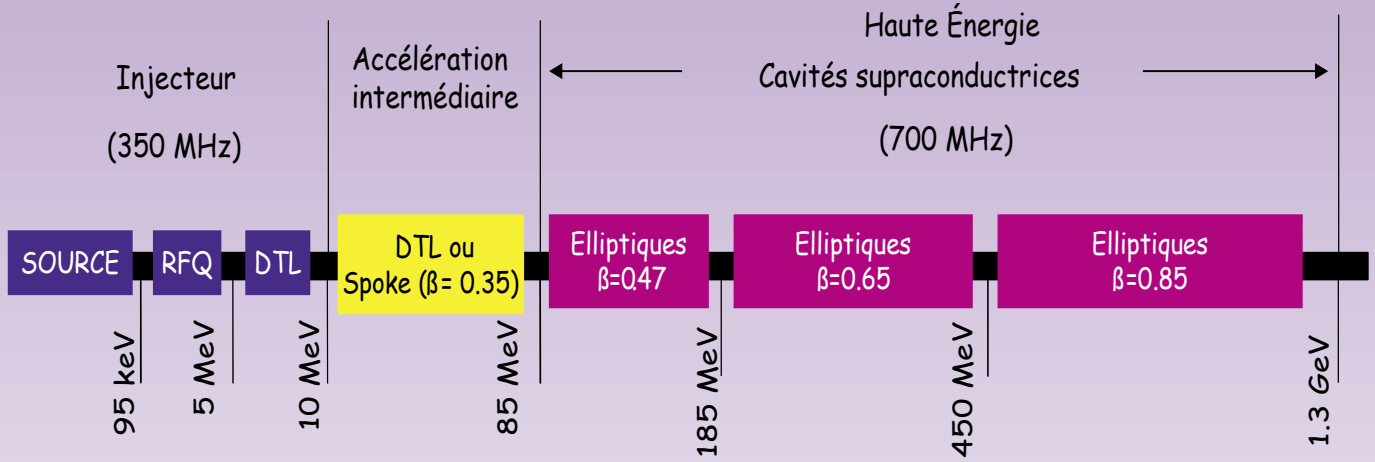
L'effectif du laboratoire est, en juin 2004, de 12 ingénieurs, 20 techniciens et 1 thésard.

Contact : chesny@dapnia.cea.fr

Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité

Les accélérateurs linéaires (Linac) de forte intensité et haute énergie, pouvant atteindre 1 GeV et quelques dizaines de milliampères en continu, trouvent de nombreuses applications en physique nucléaire, physique des particules ou encore en physique de la matière condensée. L'interaction d'un faisceau de protons, accéléré par un tel Linac, avec une cible permet de produire des particules telles que des ions radioactifs, des neutrons, des neutrinos ou des muons. Ces particules forment alors des faisceaux secondaires utilisables notamment pour la transmutation des déchets nucléaires ou l'étude de la structure de certains matériaux.

Ces accélérateurs de future génération mettront en œuvre des technologies faisant l'objet d'actifs programmes de R&D au SACM, comme le projet d'injecteur de protons de haute intensité, Iphi, pour la partie à basse énergie et le programme d'étude et de réalisation de cavités accélératrices supraconductrices à 700 MHz pour la partie à haute énergie. Les compétences acquises dans ces deux domaines ont permis au SACM de prendre une part importante dans le projet Spiral 2, un Linac complet prévu pour étudier une grande variété de noyaux exotiques.



Le projet Iphi

L'Injecteur de protons à haute intensité, Iphi, est un prototype de la partie basse énergie des accélérateurs de future génération à fort courant de protons : 100 mA accélérés jusqu'à 3 MeV. Son objectif est de disposer de références technologiques, industrielles et expérimentales pour la conception des futurs linacs, de crédibiliser les projets à forte intensité de protons en s'assurant de notre capacité à fabriquer puis à exploiter une telle installation et en vérifiant la validité des calculs de la dynamique du faisceau : les performances du faisceau en sortie du RFQ (*radio frequency quadrupole*) sont fondamentales car elles conditionnent toute la structure du Linac. Iphi se compose d'une source de protons et de son transport de faisceau à basse énergie (95 keV), d'une cavité accélératrice de type RFQ portant l'énergie à 3 MeV et d'une ligne de diagnostics destinée à mesurer avec la plus grande précision possible toutes les caractéristiques essentielles du faisceau en sortie du RFQ. Parallèlement, un prototype de DTL *(drift tube linac)*, cavité adaptée à l'accélération du faisceau issu du RFQ, a été développé. 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. A l'issue des essais prévus à partir de 2006 à Saclay, une partie de Iphi sera transférée au Cern et pourrait à terme être intégrée à l'injecteur du SPL (*Superconducting proton linac*).

Fin 2002, la source de protons Silhi a été transférée sur le site du projet Iphi. Après le redémarrage, quelques jours ont suffit pour extraire un faisceau supérieur à 100 mA.

Fabrication du RFQ

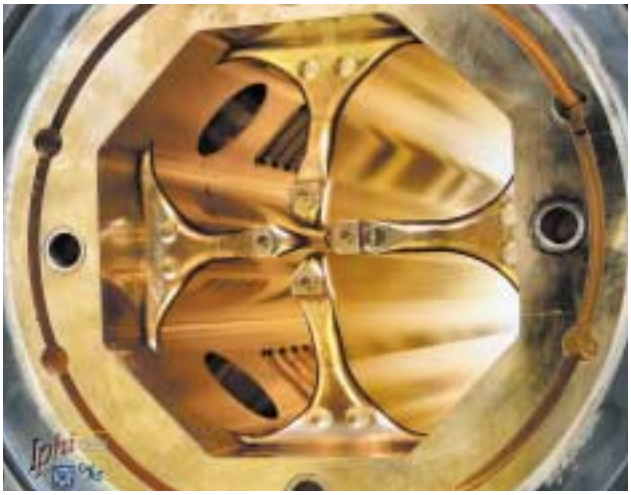
Une des particularités de cet ensemble est la rigueur des tolérances géométriques couplées à des puissances dissipées élevées. Bien que la fabrication soit précise, il faut prendre en compte les dilatations thermiques. Un métal possédant une des meilleures conductivités thermiques était requis : le cuivre. Son inconvénient est sa faible limite élastique. Une étude métallurgique, une étude thermo - mécanique et une analyse de vide ont permis de définir précisément la nature du cuivre et l'architecture des tronçons pour que les dilatations se compensent et pour respecter l'ensemble des impératifs fonctionnels.

La difficulté de l'usinage provient essentiellement d'un profil de pôles éminemment variable, de la

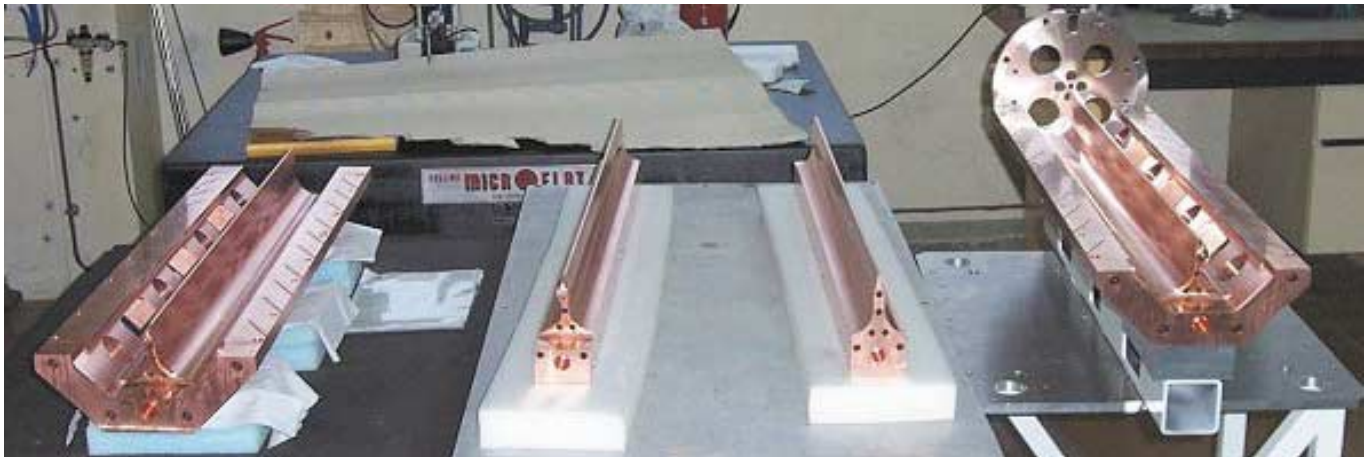
Premier tronçon du prototype de quadripôle radiofréquence (RFQ).

précision requise et de la nécessité d'éviter des contraintes rémanentes risquant de provoquer des déformations au brasage. Cela exige l'utilisation rigoureuse et le contrôle précis des machines outils. Les gammes et méthodes d'usinage ont été mises au point chez le sous-traitant retenu après plusieurs tests sur des échantillons. L'étude du brasage se divise en, d'une part, l'assemblage des brides d'extrémité en inox sans perturbation des côtes des pôles et, d'autre part, l'assemblage des 4 pôles également sans déformation.

Le prototype est fabriqué. Les tolérances sont respectées. Il a validé les gammes de fabrication même si des brasages de réparations ont dû être effectués. Les tronçons de série font l'objet d'un marché d'usinage. Ils seront brasés au Cern. Ce montage financier suppose que la maîtrise d'œuvre soit exercée par le CEA. Leur livraison est prévue pour fin 2005.



Extrémité d'un segment de RFQ. Le champ magnétique tourne à cet endroit pour passer d'un cadran à l'autre. Les formes extrêmement arrondies minimisent et répartissent les dépôts de puissance RF.



Les 4 lames du RFQ usinées avant d'être assemblées et brasées. Ce découpage en 2 lames mineures (au centre) et 2 lames majeures facilitent l'ajustage de l'assemblage.

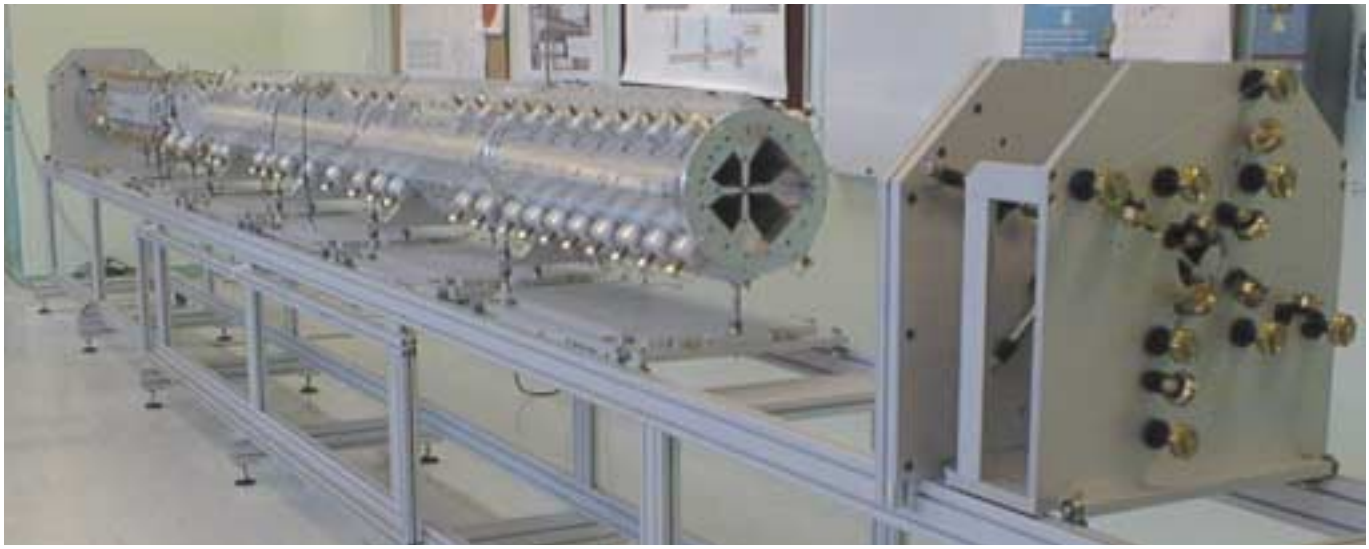
Processus de réglage radiofréquence du RFQ

Une maquette radiofréquence du RFQ a été construite dans le but de vérifier le design effectué à partir de calculs tridimensionnels, d'évaluer un certain nombre de caractéristiques difficilement accessibles par ces mêmes calculs, et enfin de démontrer l'efficacité et la précision des algorithmes de réglage radiofréquence (RF). Cette maquette est modulaire : six tronçons de 1 m peuvent former des RFQ de longueur ou de segmentation variées, réglables au moyen de pistons, plaques d'épaisseur ajustable et barres de stabilisation dipolaire. Le champ RF à l'intérieur de la cavité est mesuré par perturbation : un banc automatique piloté sous LabView© contrôle le déplacement d'une petite ogive métallique dans les 4 quadrants, et déclenche l'analyseur de réseau vectoriel. Les données brutes (~8000 échantillons) subissent d'abord des pré-traitements : compensation des dérives de phase et des non-linéarités, alignement sur une échelle de position commune, réduction du bruit, reconstitution des tensions et de leur signe et des conditions aux limites (extrémités, couplages). Un modèle numérique calcule ensuite les corrections des paramètres de ligne et les cotes des accessoires réglables. Il est également utilisé pour contrôler la symétrie électrique du RFQ lors des fabrications. Nous avons développé un logiciel orienté utilisateur qui permet de séquencer l'exécution des 38 *processing-blocks* existant actuellement. Un noyau commun gère automatiquement les évolutions logicielles et les variations des paramètres du traitement, assurant la continuité opérationnelle du programme au cours des années.

Dans notre modèle, le RFQ est simulé par une ligne de transmission quadrifilaire chargée. Une analyse mathématique rigoureuse a permis d'établir des relations inversibles entre des perturbations infinitésimales des paramètres de ligne, et les perturbations des tensions inter-électrode qui en résultent. Les réglages consistent donc en général en un certain nombre d'itérations du cycle {mesure des per-

turbations de tension, correction des paramètres de ligne}. Les conditions de convergence sont également démontrées mathématiquement.

Notre modèle a été testé avec succès dans de nombreuses configurations : un segment de 1 m, un segment de 2 m, un segment de 3 m, deux segments de 1 m couplés avec des électrodes à profil constant, puis à profil variable, et récemment deux segments de 2 m couplés, où des erreurs de tension de 40 % ont été ramenées à moins de 2 % en trois itérations. Les défauts de symétrie de ligne sont identifiables à partir de quelque pour mille. À la suite de ces validations, le modèle pourra être utilisé lors de la conception de RFQ, par exemple pour des analyses de stabilité RF, de sensibilité aux déformations thermiques, etc. Enfin, il est adaptable à toute sorte de cavité.



Maquette de RFQ modulaire pour mesures RF. Les 6 tronçons de 1 m sont assemblés. Les deux platines d'extrémité (dont l'une au premier plan) servent à tendre le fil sur lequel est fixé le perturbateur, une ogive métallique. Des antennes placées sur chaque bride latérale relèvent le champ résultant de cette perturbation.

Prototype du DTL

Le DTL est une structure accélératrice radiofréquence dédiée aux ions, légers ou lourds, de conception remontant aux années 1950. Il reste néanmoins une machine actuelle comme en témoigne son utilisation dans un accélérateur récent : le SNS *(Spallation neutron source)* aux Etats-Unis. Cette structure, alternance d'espaces accélérateurs et de tubes de glissement (tubes métalliques protégeant le faisceau de la phase de décélération de l'onde hyperfréquence, et abritant les quadripôles nécessaires à sa focalisation), est intéressante pour une machine de puissance comme Iphi en raison de sa fiabilité et de ses performances (rendement accélérateur, impédance shunt, etc.). Néanmoins, jamais un DTL adapté à des courants de protons de quelques dizaines de milliampères n'a été

Les deux modèles de quadripôles magnétiques développés pour le DTL. A gauche : aimant conventionnel en fer cobalt ;
à droite : aimant innovant à refroidissement externe à l'eau.

réalisé. Les difficultés sont liées en particulier à la force des aimants de focalisation qu'il convient de placer dans les petits tubes de glissement et aux dépôts de puissance sur les parois de la machine et sur les tubes de glissement.

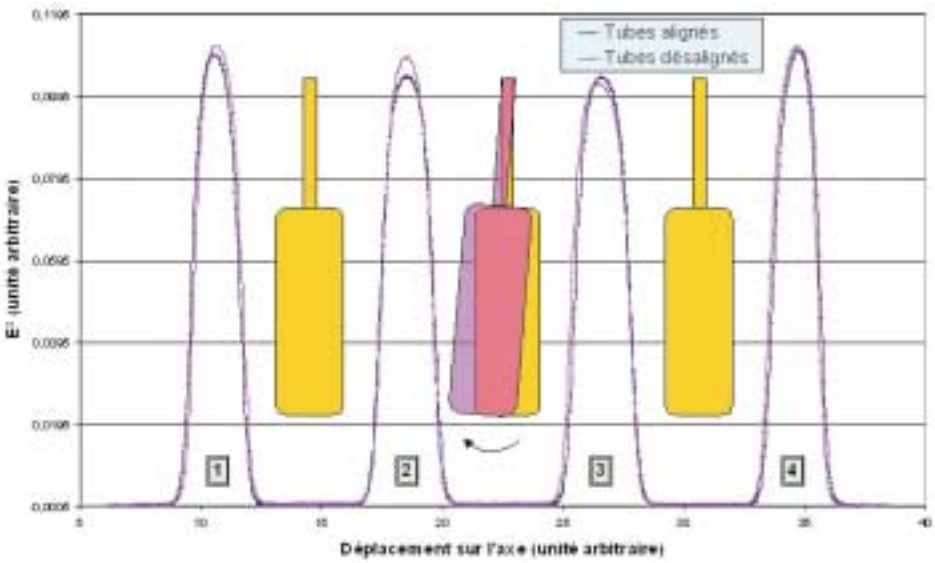
Aussi, un prototype du DTL a-t-il été conçu et réalisé. Il reproduit la partie initiale du DTL complet, la plus complexe car la plus compacte. Il comprend quatre espaces accélérateurs, trois tubes de glissement entiers, qui enferment pour deux d'entre eux un aimant de focalisation. Ceux-ci sont de deux conceptions différentes. Le premier est conventionnel, réalisé en fer - cobalt et alimenté par des conducteurs creux (donc auto - refroidis). Néanmoins, compte tenu des dimensions particulièrement réduites, cette technologie atteint ses limites ; un concept nouveau d'aimant dont les conducteurs sont refroidis par l'extérieur a été développé. Cette innovation assure un meilleur rendement sur les plans thermique et magnétique.

Les tubes de glissement enfermant ces aimants sont en cuivre pur, soudé par bombardement électronique. Les tolérances de réalisation sont de l'ordre du centième de millimètre. L'enceinte du prototype est en acier inoxydable, cuivrée sur ses deux faces par un procédé électrolytique. Le cuivrage interne, épais de 50 microns, permet d'obtenir la conductivité électrique nécessaire à l'obtention des caractéristiques radiofréquences, tandis que le cuivrage externe donne à l'enveloppe des propriétés thermiques suffisantes pour évacuer les fortes puissances déposées.

Ce prototype a été testé dans les conditions de puissance réelles au Cern : 50 kW ont été injectés en continu dans cette machine longue de 35 cm et de 50 cm de diamètre. Différents essais ont été conduits : vérification du champ accélérateur à froid puis à chaud par une technique de spectroscopie X, analyse du comportement thermique de la cavité, désalignement des tubes de glissement par

Vue intérieure du prototype de DTL. Propreté et arrondis sont les maîtres mots. Les trois tubes de glissement sont parfaitement alignés et doivent le rester pendant le fonctionnement.

effet thermique, influence des joints et des contacts sur le facteur de qualité, vide, etc. Ces essais ont permis de vérifier la viabilité des concepts retenus, tant au niveau de la mécanique et de la technologie de la cavité accélératrice que des aimants de focalisation, et d'identifier des améliorations possibles. Les objectifs fixés ont été atteints : deux modèles d'aimants quadripolaires ont été testés avec succès, et une technologie de fabrication viable adaptée à un DTL de puissance est identifiée, ouvrant la voie à une machine complète.



Analyse du champ accélérateur à froid lors des essais du prototype de DTL. La courbe en bleue correspond à une mesure avec tous les tubes de glissement alignés. La courbe en rose indique l'effet du désalignement d'un tube de glissement sur l'évolution du champ accélérateur.

Le projet Spiral 2

Le projet Spiral 2 a pour objet l'étude de la structure des noyaux riches ou déficients en neutrons, donc loin de la vallée de stabilité, par la méthode Isol *(isotope separation on-line)*, en couvrant un domaine beaucoup plus vaste d'ions radioactifs et avec des intensités bien plus grandes que celles actuellement disponibles au laboratoire du Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) de Caen.

Pendant la phase de propositions techniques, le Ganil a consulté le SACM, en particulier pour le Linac et la cible, ce qui s'est concrétisé par le lancement d'un avant-projet détaillé de 2 ans financé par le CEA, le CNRS et la région Basse Normandie. Il a débuté en novembre 2002 afin d'actualiser les objectifs scientifiques, de préciser les choix techniques retenus et définir les programmes de R&D nécessaires ainsi que les options de sûreté et de radioprotection. En outre, le rapport final devra contenir les spécifications prêtes à être soumises à un appel d'offre, une estimation des coûts de construction et un échéancier des constructions et des dépenses.

L'équipe est composée de personnes appartenant à 8 laboratoires différents, ce qui représente le travail de 60 personnes pendant 2 ans. La direction a été confiée à un chef de projet membre du SACM. Le SACM est plus particulièrement en charge de tous les composants du Linac : la conception, les développements et les fabrications nécessaires à la validation des options.

La méthode de production choisie repose sur la fission induite soit par des neutrons rapides issus d'un convertisseur en carbone sur une cible de carbure d'uranium, soit par un bombardement direct du matériau fissile. De plus, l'accélération de faisceaux d'ions lourds à haute intensité permettra de conduire des expériences de fusion-évaporation. L'accélérateur pilote produira des faisceaux de deutons de 5 mA à 40 MeV ou des faisceaux d'ions de 1 mA à environ 15 MeV par nucléon, caractérisés par un rapport de la charge électrique sur le nombre de masse de l'ion de 1/3, avec la possibilité d'une augmentation ultérieure de la masse et de l'énergie. Le faisceau de deutons sera converti en flux intense de neutrons dans un convertisseur en carbone qui produira 10^{13} fissions par seconde dans une cible épaisse de carbure d'uranium. Après diffusion et ionisation, les faisceaux d'ions seront triés par un séparateur et pourront être ré-accélérés dans le Cyclotron à ions de moyenne énergie (Cime) après avoir été davantage ionisés par un multiplicateur de charge du type ECR (résonance cyclotronique électronique).

Les options suivantes ont été choisies :

- La source de deutons est inspirée de la source Silhi.
- Il faut développer et améliorer la technique de fabrication du quadripôle radiofréquence afin d'en diminuer les coûts.
- Après l'étude de plusieurs configurations de résonateurs supraconducteurs, le projet a opté pour une structure compacte, avec un ensemble de petits cryostats contenant une ou deux cavités quart d'onde, la focalisation se faisant par des quadripôles intercalés entre les cryostats. L'enjeu est d'obtenir, dans ces cavités de grande surface interne, des champs électriques de surface de l'ordre de 40 MV/m, sans émission de champ ni dégradation du coefficient de surtension.

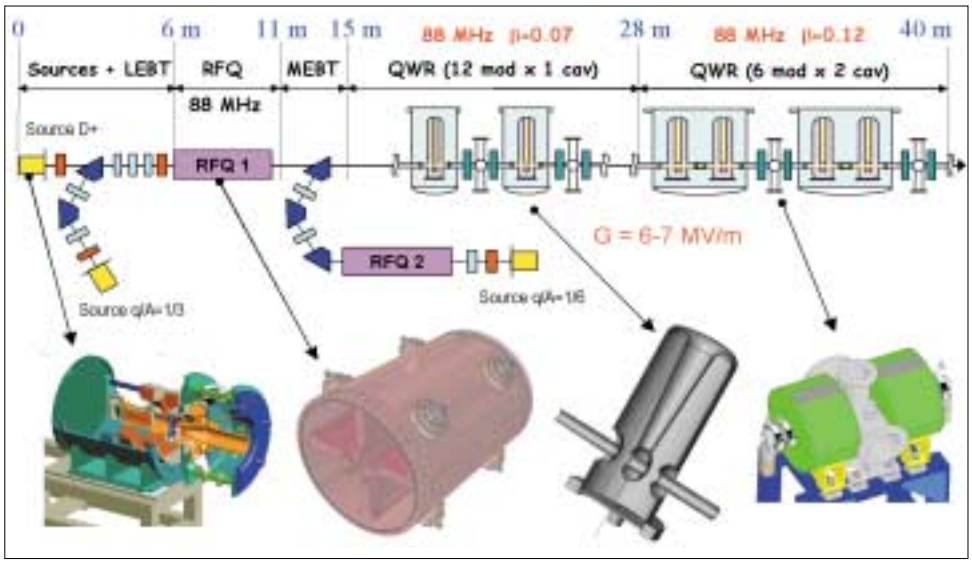


Schéma de l'architecture du Linac de Spiral 2.

LEBT : *Low energy beam transport*
RFQ : *Radiofrequency quadrupole*
MEBT : *Medium energy beam transport*
QWR : *Quater-wave resonators*
q/A : rapport de la charge électrique sur le nombre de masse de l'ion
ß : vitesse relative des particules par rapport à celle de la lumière

Cavités supraconductrices pour Linac à protons

A haute énergie, les protons peuvent être accélérés par des cavités supraconductrices en niobium de forme elliptique qui fonctionnent à la température de l'hélium superfluide (< 2,17 K). Cette partie à haute énergie du Linac est constituée de plusieurs tronçons, contenant des groupes de cavités multicellulaires ayant des géométries différentes, adaptées à la vitesse relative des protons par rapport à la vitesse de la lumière (ß = v/c = 0.47, 0.65, 0.85). Au cours des trois dernières années, nous avons mis en place un certain nombre « d'outils » nous permettant de réaliser et de tester ces cavités.

Conception, fabrication et tests des cavités

Le travail de conception et les premiers tests sur des monocellules ont fait l'objet d'une thèse soutenue en 2001. Des codes de calcul 3-D électromagnétique et mécanique ont été utilisés pour définir le profil de la cavité. Le champ électrique accélérateur sur l'axe du faisceau est optimisé, tout en limitant les maxima des champs électrique et magnétique sur la surface interne de la cavité. En effet, ces derniers sont responsables de phénomènes limitant les performances de la cavité : l'émission d'électrons à partir de la surface et l'échauffement de la paroi conduisant à la perte de l'état supraconducteur pour le niobium. Ces cavités nécessitent d'avoir également un très bon facteur de qualité[1] afin de minimiser la consommation cryogénique.

Cavité elliptique monocellulaire équipée de son enceinte d'hélium.

A la suite du travail effectué sur des cavités monocellulaires, le développement s'est poursuivi avec la fabrication et le test d'une cavité à 5 cellules (f = 700 MHz, ß = 0,65), en collaboration avec l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3). Dans les deux cas, les cavités réalisées ont eu des performances d'environ 30 % supérieures aux spécifications requises pour leur implantation sur le Linac.

Cavité à cinq cellules en salle blanche. Avant d'être testée, la cavité est rincée à l'eau ultra pure sous haute pression (à 80 bars).

A l'heure actuelle, la R&D est centrée sur la réalisation et le test de cavités mono et multicellulaires ayant une valeur de ß = 0,47 ainsi que sur la poursuite des développements technologiques nécessaires.

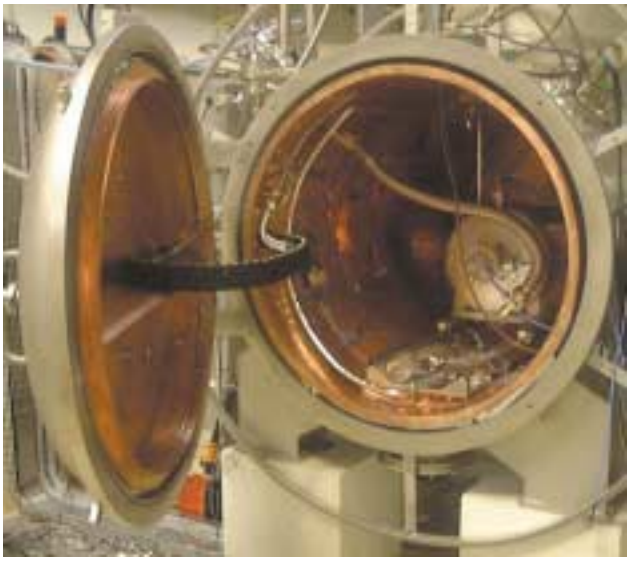
Développements technologiques

La longueur (1 m) et la masse (~100 kg) d'une cavité à 5 cellules étant conséquentes, il a fallu développer des outils de mise en œuvre spécifiques, en particulier des chariots de manutention dont l'un est spécialement adapté à l'environnement hors poussière en salle blanche.

Afin de poursuivre l'équipement complet de la cavité, nous développons, en collaboration avec l'IN2P3, un système d'accord à froid qui permet d'ajuster la fréquence de la cavité par déformation mécanique, ainsi qu'un coupleur de puissance et son banc de test associé qui permet d'injecter le champ radiofréquence dans la cavité.

Mise en service de Cryholab

Cryholab est un cryostat horizontal de laboratoire qui permet de tester des cavités supraconductrices monocellulaires et multicellulaires à la température de l'hélium liquide (4,2 K) ou superfluide (1,8 K), dans



Cavité à cinq cellules dans Cryholab.

des conditions proches de celles d'un accélérateur : un réservoir d'hélium est soudé autour de la cavité, et celle-ci est positionnée horizontalement équipée de son coupleur de puissance et de son système d'accord à froid. Pour un fonctionnement autonome de Cryholab, un liquéfacteur, fournissant l'hélium liquide nécessaire, lui est directement associé.

Cryholab a été conçu et construit en collaboration avec l'IN2P3 et en partie financé par la région Ile de France.

Pour des raisons d'isolation thermique, le cryostat est d'abord refroidi à la température de l'azote liquide (77 K) : ce type de contrainte se retrouve également sur un accélérateur. Le processus de descente en froid de la cavité se fait donc lentement et dégrade les performances de la cavité car des hydrures de niobium se forment aux alentours de 100 K. Pour éviter ce phénomène, la cavité doit subir au préalable un recuit afin d'éliminer l'hydrogène piégé dans le matériau ; cette opération s'effectue à 800 °C dans un four sous vide.

L'installation et la mise en service de Cryholab ont été réalisées en 2000 et 2001. Les premiers tests sur des cavités monocellulaires ont eu lieu fin 2001 et début 2002. Le test d'une cavité à 5 cellules a été effectué début 2003 avec un cryogénérateur d'hélium opérationnel. Le coupleur, qui permettra d'injecter l'onde radiofréquence à 700 MHz en mode continu (avec une puissance de 80 kW) ou pulsé (puissance de 1 MW) a été étudié et est en cours de réalisation.

Cryholab sera utilisé pour le test de nombreux autres types de cavités supraconductrices dans le cadre de plusieurs programmes européens concernant des développements sur les accélérateurs.

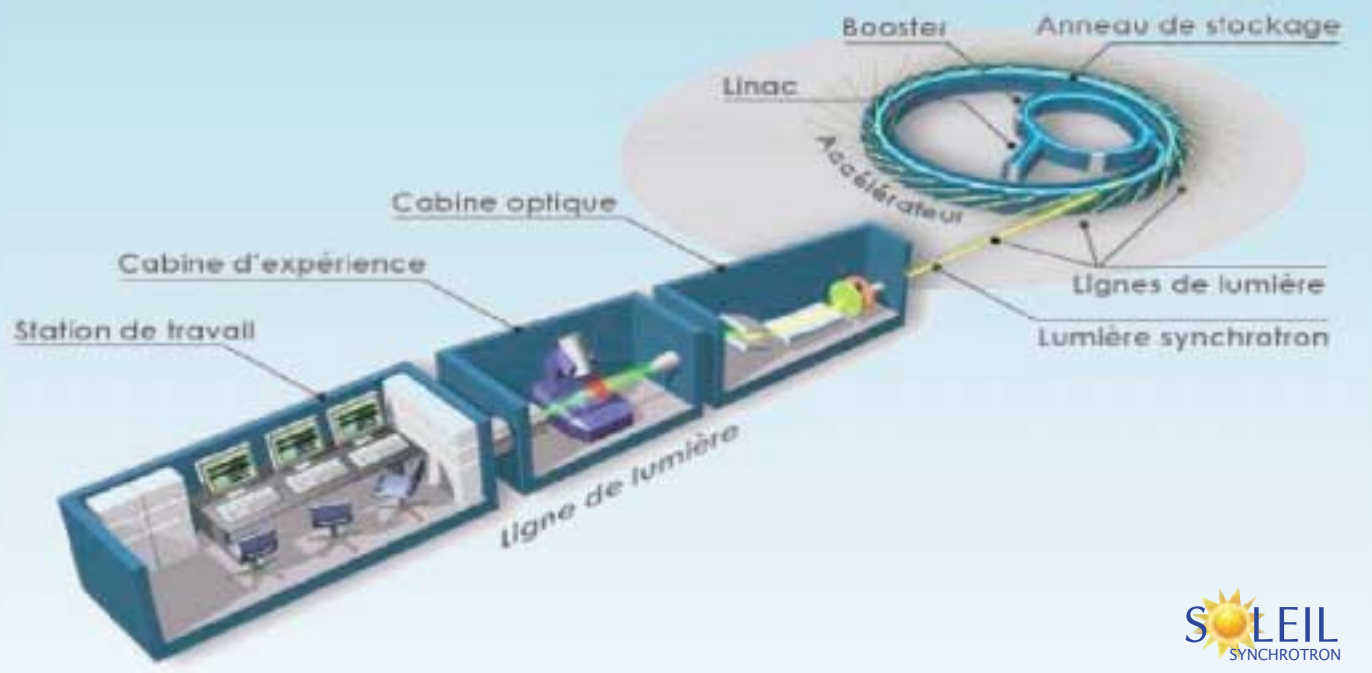
[1]Le facteur de qualité (ou coefficient de surtension) est proportionnel au rapport de l'énergie radiofréquence stockée dans la cavité sur l'énergie dissipée sur une période RF.

Plateforme Cryholab dédiée aux tests de cavités supraconductrices dans des conditions proches de celles d'un accélérateur.

Collisionneurs linéaires d'électrons-positons et sources de lumière

L'avancée des connaissances en physique des particules est étroitement liée à la disponibilité de faisceaux toujours plus performants possédant d'avantage d'énergie et de luminosité. L'accélérateur d'électrons est aussi une pièce maîtresse des lasers à électrons libres fonctionnant dans le domaine des rayons ultraviolets et des rayons X. Pour fournir des faisceaux de lumière de forte brillance utilisés en physique du solide, en chimie, en biologie, les machines à rayonnement synchrotron de la 3ème génération fonctionnent également avec des faisceaux très intenses d'électrons.

Le SACM est impliqué dans le projet Tesla *(Tera-electronvolt energy superconducting linear accelerator)*, collisionneur linéaire e^+e^- entièrement supraconducteur. Son expertise acquise dans les sources du type laser à électrons libres, avec l'obtention d'un effet d'émission spontanée auto-amplifiée sur l'accélérateur prototype TTF *(Tesla test facility)*, lui a permis de contribuer à la proposition Arc-en-ciel *(Accelerator-radiation complex for enhanced coherent intense extended light)*, une installation innovante de source de lumière de 4ème génération. Le service est également largement impliqué dans la conception des sources de lumière de 3ème génération suite à sa participation à l'avant projet Soleil (Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire de Lure), où il a développé une structure originale de cavités supraconductrices qui a été utilisée pour améliorer deux sources de rayonnement existantes.



Le projet Tesla et l'accélérateur prototype TTF

Tesla est un projet de collisionneur linéaire à électrons-positons pour la physique des particules visant des énergies de l'ordre du teraélectronvolt. La construction et l'exploitation de la maquette TTF au laboratoire de Desy *(Deutsches elektronen synchrotron)* en Allemagne a permis de vérifier les performances des différents composants et d'estimer de façon réaliste les coûts d'une telle machine. Cette installation a également permis de démontrer la faisabilité d'un laser à électrons libres fonctionnant en mode d'émission spontanée autoamplifiée (mode Sase) dans le domaine du rayonnement ultraviolet.

Le projet Tesla

Après la publication en mars 2001 du *Technical design report* qui décrit le projet complet, nous travaillons à présent à l'amélioration du système de transport du faisceau vers le point d'interaction par la conception des trois sous-ensembles suivants :

- l'aiguillage du faisceau : on a adopté une structure comparable à celle utilisée sur les sources de rayonnement synchrotron pour minimiser l'augmentation d'émittance induite par le rayonnement synchrotron,
- la ligne d'extraction d'urgence,
- le système de collimation de la ligne de transport final, en prenant en compte les effets d'ordre supérieurs induits par la dispersion en énergie du faisceau.

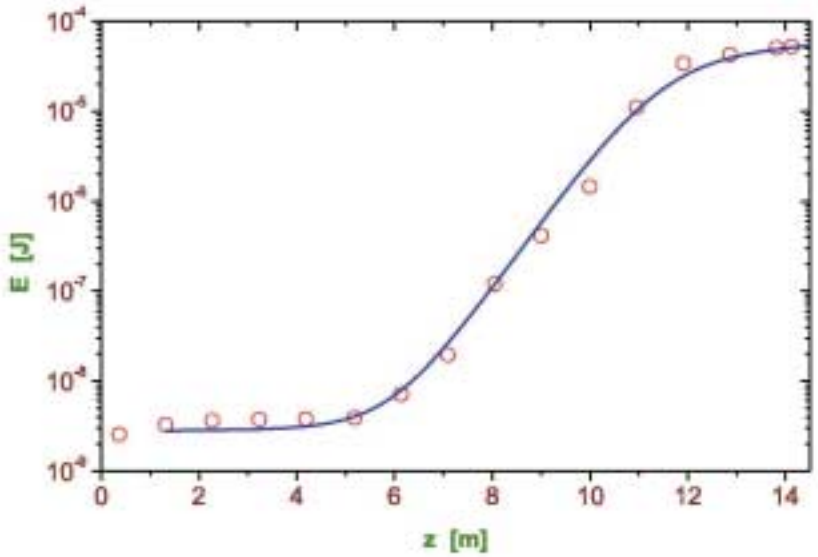
L'accélérateur prototype TTF

En septembre 2001, en atteignant le régime de saturation de l'émission cohérente, l'installation TTF a démontré la validité du principe d'émission spontanée auto-amplifiée (Sase) de lumière UV, de longueur d'onde égale à 98 nm, dans un laser à électrons libres.

Par ailleurs, au cours de l'année 2003, deux cavités supraconductrices à 9 cellules électropolies ont atteint le gradient accélérateur de 35 MV/m dans des tests de fonctionnement de longue durée dans le cryostat horizontal d'essai Chechia fourni par le Dapnia en 1999.

Le SACM a participé à ces résultats à quatre titres :

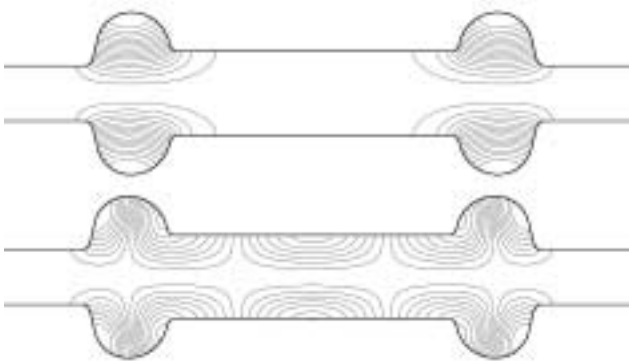
- Le bon fonctionnement de deux moniteurs de position permettant d'aligner la trajectoire du faisceau à l'entrée de l'onduleur, condition obligée pour l'amplification du signal Sase-FEL. Nous avons également conçu un nouveau moniteur spécialement adapté à un environnement cryogénique, qui sera prochainement testé dans un cryomodule de TTF et qui pourra être utilisé dans Tesla comme dans le projet X-FEL de laser à électrons libres dans le domaine des rayons X.
- La mise en service du système de protection de la machine de TTF utilisant une électronique rapide de comparaison du courant du faisceau mesuré en différents points le long du linac.
- La mise au point de la méthode d'étuvage à 110°C comme dernière étape de la préparation des cavités supraconductrices électropolies. En abaissant la résistance de la surface et donc en évitant l'échauffement généralisé des cavités, cette méthode permet d'augmenter la limite du champ accélérateur d'environ 10 MV/m ou plus selon les cavités.
- La caractérisation par des mesures avec faisceau des modes supérieurs HOM *(high order modes)* pour valider les paramètres d'amortissement visés par le projet Tesla et améliorer l'alignement des cavités par rapport au faisceau.



Saturation du signal Sase-FEL le long de l'onduleur de TTF. L'interaction entre le paquet d'électrons et les photons émis par rayonnement synchrotron dans l'onduleur produit une amplification cohérente de l'émission lumineuse. Elle doit se faire en un seul passage car il n'existe pas de miroirs pour les longueurs d'onde très faibles. Cette application exige un faisceau de forte intensité et de bonne qualité optique car l'interaction entre le faisceau d'électrons et le rayonnement est relativement faible pour les rayons UV et X.

Cavités supraconductrice pour machines à rayonnement synchrotron : cryomodules Soleil et Super-3HC

Pour fournir des faisceaux de lumière de forte brillance, les machines à rayonnement synchrotron de 3ème génération fonctionnent avec des faisceaux très intenses d'électrons répartis en paquets de dimension très réduite. Ces caractéristiques peuvent générer des instabilités dangereuses pour le faisceau. La technologie des cavités supraconductrices est un des éléments permettant de franchir ces instabilités et d'atteindre les caractéristiques du faisceau requises pour les fortes brillances.



Distribution du champ électrique, dans la structure radiofréquence Soleil, pour le mode fondamental (dessin du haut) et pour le mode HOM, l'harmonique d'ordre le plus élevé (dessin du bas). Les coupleurs, situés aux ventres des ondes stationnaires vibrant entre les deux cavités, évacuent vers l'extérieur les ondes parasites.

L'activité du SACM dans ce domaine repose sur une structure radiofréquence (RF) supraconductrice à 4,5 K, dont l'idée originale a pu être développée dans le cadre de l'avant projet détaillé du projet Soleil (Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire de Lure). Cette « cavité Soleil » est constituée de deux cellules reliées par un tube de gros diamètre. Le diamètre et la longueur du tube sont calculés pour piéger le mode fondamental à l'intérieur de chaque cellule tout en permettant l'extraction des modes de fréquence supérieure. Le faisceau d'électrons, dont la structure est périodique, est une source d'excitation pour les modes supérieurs à l'origine d'instabilités. Des coupleurs à boucle supraconductrice disposés sur le tube intérieur amortissent ces modes. L'emplacement et la géométrie de ces coupleurs sont optimisés par le calcul puis par des mesures sur des maquettes. Ce type de cavité monomode a été développé au SACM pour deux applications :

- Le cryomodule Soleil, qui compense l'énergie électromagnétique perdue à chaque tour sous forme de rayonnement synchrotron en injectant une puissance RF externe : à terme 650 kW seront transférés au faisceau en continu par des coupleurs de puissance.
- Les cryomodules Super-3HC *(Third harmonic superconducting passive cavities)* qui suppriment des instabilités du faisceau par effet *Landau damping* et augmentent sa durée de vie. Là, ce sont les électrons du faisceau qui transfèrent une faible partie de leur énergie pour générer le champ dans les cavités.

Cryomodules Soleil

Le cryomodule prototype, fonctionnant à 352 MHz et 4,5 K, a été étudié et réalisé par le SACM en collaboration avec le Cern. Les premiers tests en puissance ont eu lieu au Cern en décembre 1999. Ensuite, nous avons signé un accord avec l'ESRF *(European synchrotron radiation facility)* pour effectuer une campagne de tests avec faisceau sur l'anneau de Grenoble, à froid et à température ambiante. Ce second mode de fonctionnement n'était pas prévu à l'origine ; l'année 2001 a été consacrée à la préparation du cryomodule afin de le rendre utilisable à température ambiante sans incidence pour les utilisateurs de la machine. Lors des tests effectués en 2002 à l'ESRF, le cryomodule Soleil a généré une tension RF crête supérieure à 3 MV avec une puissance de 200 kW par cavité, de façon stable, pendant plusieurs heures, contribuant ainsi à stocker un courant d'électrons de 180 mA. Ces performances sont suffisantes pour la première année de fonctionnement de Soleil en 2005. Il a donc été décidé que la mise en service de Soleil serait réalisée avec ce seul cryomodule prototype.

Cavité Soleil prête pour l'assemblage en salle blanche.

Cryomodule Soleil installé sur l'anneau de stockage de l'ESRF pendant l'année 2002.

Avant son installation sur la machine, le cryomodule subira un démontage complet et les cavités seront rincées. De plus, dans le cadre d'une collaboration CEA-Soleil-Cern, nous installerons de nouveaux coupleurs HOM dipolaires pour permettre une meilleure réjection du mode fondamental, nous modifierons le circuit interne d'hélium pour améliorer le refroidissement de la boucle de ces coupleurs, nous ajouterons un écran d'isolation thermique pour diminuer les pertes cryogéniques statiques, et nous rénoverons toute l'instrumentation. Les études mécaniques ont été sous-traitées entre mai et août 2003, et les opérations de démontage ont débuté en novembre 2003. Les tests en puissance du cryomodule rénové sont prévus en décembre 2004 au Cern.

Un deuxième cryomodule reprenant le même design que le premier et intégrant quelques améliorations supplémentaires est en cours d'élaboration. Son installation sur la machine est prévue en 2006.

Cryomodules Super-3HC

Deux cryomodules à cavités harmoniques supraconductrices ont été développés et réalisés dans le cadre d'un accord entre la Direction des sciences de la matière du CEA et les sources de lumière SLS *(Swiss light source, Paul Scherrer institut)* et Elettra (Trieste, Italie). Le Cern est intervenu dans ce projet pour fabriquer les deux cavités en niobium-cuivre à 1,5 GHz. Les études ont commencé en 2000. Après les phases de réalisation, d'assemblage et de tests, les deux cryomodules Super-3HC ont été installés sur leurs machines respectives, SLS en juin et Elettra en août 2002.

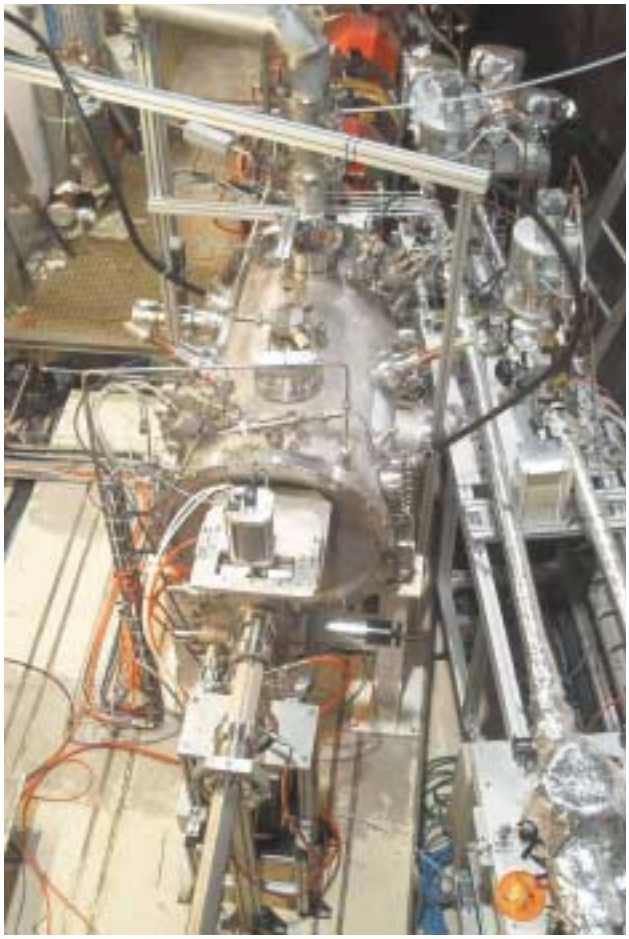
La mise en œuvre du module SLS a montré l'efficacité prévue par le calcul sur la stabilité et la durée de vie du faisceau : augmentation d'un facteur 2,2 mesurée. Pendant l'année 2003 le fonctionnement nominal de la machine s'est donc poursuivi avec les cavités Super-3HC activées, sans aucun arrêt de la machine provoqué par le cryomodule. Sa fiabilité est ainsi démontrée.

Assemblage des cavités Super-3HC dans la salle blanche du SACM.

La mise en œuvre du module Elettra a été retardée par des problèmes techniques sur le liquéfacteur ; la première mise en froid a été effectuée début janvier 2003. Pendant les périodes de fonctionnement à température ambiante, le seul mode de fonctionnement possible est un mode à haute énergie (2,4 GeV) car à plus faible énergie (2,0 GeV) le faisceau devient instable à cause des interactions avec les cavités Super-3HC. Ce problème, qui n'avait pas été anticipé par Elettra est le défaut majeur du système qui interdit certains modes de fonctionnement en cas de panne du liquéfacteur. Par contre, à froid, l'activation des cavités supraconductrices apporte un gain très important en

terme de stabilité et de durée de vie du faisceau. Grâce aux cavités Super-3HC, Elettra a pu pour la première fois délivrer un faisceau de 2,0 GeV et 320 mA, stable longitudinalement. Une augmentation de la durée de vie d'un facteur 3,5 a été mesurée.

Ces cavités harmoniques supraconductrices sont les premières à être installées avec succès sur des machines à rayonnement synchrotron.



Cryomodule Super-3HC installé sur l'anneau de Elettra à Trieste.

Les quadripôles et dipôles de l'anneau de stockage du synchrotron Soleil

Les quadripôles et les dipôles de l'anneau de stockage du projet Soleil avaient été partiellement étudiés durant la période 1997-1998 pour l'avant projet détaillé (APD) Soleil. On distingue deux types de quadripôles, à savoir 128 quadripôles courts et 32 quadripôles longs, ayant la même section transversale du circuit magnétique. La reprise de l'APD en 2001 a débouché sur la réactualisation des paramètres de la machine, en particulier son fonctionnement à un niveau d'énergie supérieure (2,75 GeV).

La reprise de l'ADP Soleil a permis de finaliser l'étude des deux types de quadripôle. Les modélisations réalisées à l'aide du code tridimensionnel Tosca[1] ont conduit à optimiser la section courante et la géométrie d'extrémité de ces aimants en minimisant les taux d'harmoniques néfastes pour l'optique, tout en conservant l'homogénéité de l'intégrale du gradient dans la zone utile à mieux que $5x10^{-4}$. Seul le chanfrein d'extrémité à 45° varie d'un quadripôle à l'autre afin de réduire les termes multipolaires dodécapôles et "20-pôles" à des valeurs inférieures à $5x10^{-5}$.

Les quadripôles prototypes seront mesurés courant 2004 au laboratoire de mesures magnétiques de Soleil sur le site du CEA/Orme des Merisiers.

Le dipôle de l'anneau de stockage fonctionne à l'induction nominale de 1,71 T correspondant à l'énergie de la machine de 2,75 GeV. La version préliminaire de ce dipôle était courbe avec un circuit magnétique en C. Il est maintenant droit et en H ce qui permet d'obtenir l'homogénéité requise de $5x10^{-4}$ des intégrales de champ et une longueur magnétique ajustée à la longueur curviligne du fer.

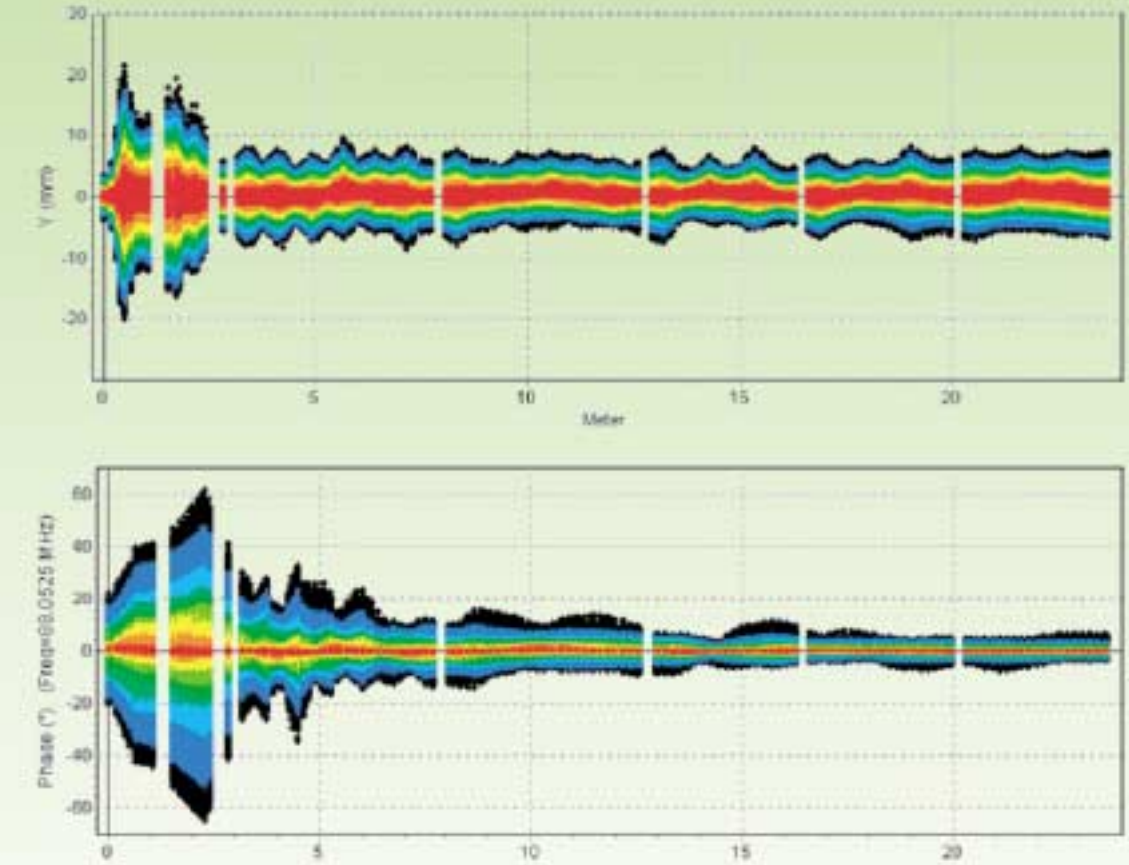
L'homogénéité de champ d'un dipôle prototype mesurée au laboratoire de mesures magnétiques est conforme aux simulations. Les soudures le long de l'aimant pour maintenir les tôles ont par contre provoqué un décalage de 1 mm sur les longueurs magnétiques entre l'entrée et la sortie. L'analyse de cet effet se poursuit.

[1]Tosca est un code commercial développé par *Vector Fields*.

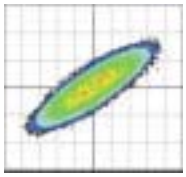
Développements pour les accélérateurs de particules

Chaque nouveau projet nécesssitent de relever de nombreux défis et requiert généralement une R&D spécifique. Inversement il arrive souvent que les avancées d'une R&D particulière soient profitables à l'ensemble des projets. Plusieurs axes de R&D spécifiques aux accélérateurs sont suivis au SACM :

- La mise au point de modèles analytiques et le développement de méthodes numériques pour une modélisation de la dynamique des faisceaux de particules adaptée aux exigences de plus en plus grandes sur les paramètres de fonctionnement (énergie, luminosité, fiabilité,...).
- Le développement de sources d'ions basées sur un plasma généré par résonance cyclotronique électronique pour produire des faisceaux intenses d'ions H^+ et H^- ; les progrès permettent d'atteindre des intensités et des fiabilités de plus en plus élevées.
- Des études systématiques pour comprendre l'origine physique des limitations du champ accélérateur dans les cavités radiofréquences supraconductrices et définir les traitements adéquats pour atteindre des performances élevées ; de plus, des développements technologiques permettent d'étudier la réalisation des cryomodules complets, dans l'environnement d'un accélérateur, en y intégrant les cavités supraconductrices, les divers équipements RF, ainsi que l'instrumentation associée.



Dynamique des faisceaux de particules

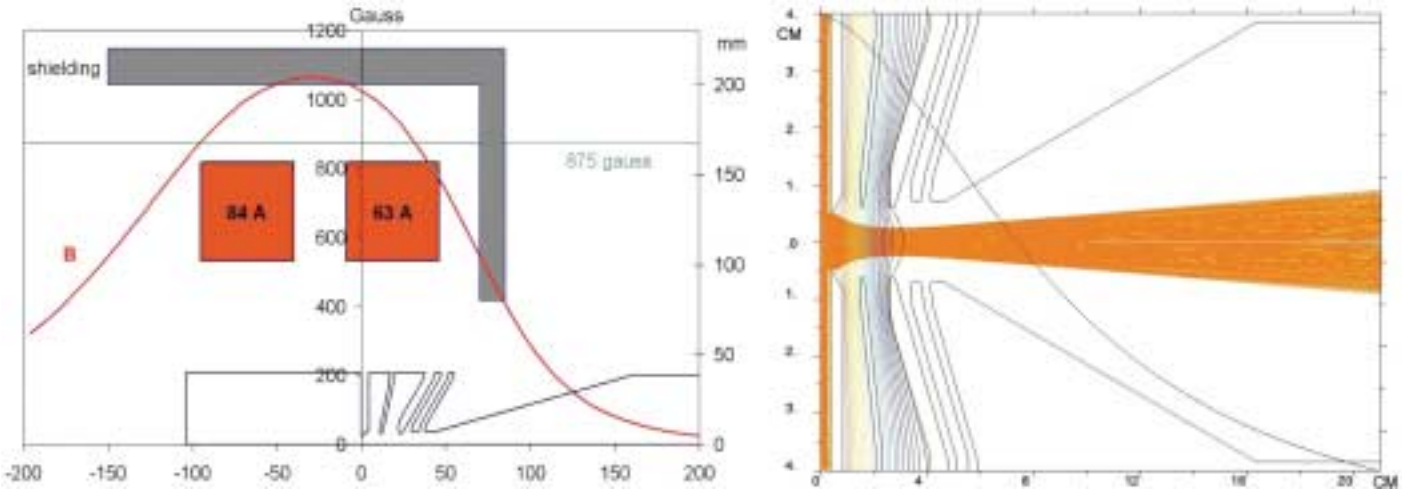


La dynamique des faisceaux peut se définir comme l'étude du mouvement de particules chargées dans des champs électromagnétiques statiques ou dépendant du temps. Ces champs peuvent être externes (aimants de courbure ou de focalisation) ou bien générés par la distribution des particules (charge d'espace[1], effet d'image, champ de sillage, interaction faisceau-faisceau). 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 (diffusion, ionisation, compensation de charge d'espace), de l'interaction avec les interfaces solides (cibles, fenêtres, collimateurs), la dynamique des plasmas des sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électromagnétiques d'ordres élevés (hexapôles, octupôles, cartes de champ), la maîtrise de la formation du halo et des pertes du faisceau pour la maintenance des futurs accélérateurs de puissance (moins de 1 W/m pour des faisceaux de plusieurs mégawatts). 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.

Transport de particules dans une ligne à basse énergie

L'émittance[2] 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. Le gaz résiduel de la chambre à vide ionise des atomes au passage du faisceau et induit ainsi 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 sont actuellement menés pour améliorer la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans la dynamique des faisceaux intenses en régime de compensation de charge d'espace. Ils font l'objet d'une thèse au SACM.

L'étude du système d'extraction des sources comprend plusieurs aspects. Tout d'abord la configuration magnétique de la source, avec des bobines ou des aimants permanents, doit assurer la résonance cyclotronique électronique (ECR), ce qui conduit à optimiser le profil du champ magnétique et l'ajustement longitudinal de la zone ECR. La modélisation du système d'extraction est effectuée en calculant le ménisque d'expansion du plasma et la génération du faisceau à travers un système d'extraction multi- électrodes. 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, en tenant compte d'un facteur de compensation, constant ou bien local, que l'on confronte à des mesures expérimentales de l'émittance du faisceau dans l'attente d'une description plus fine.

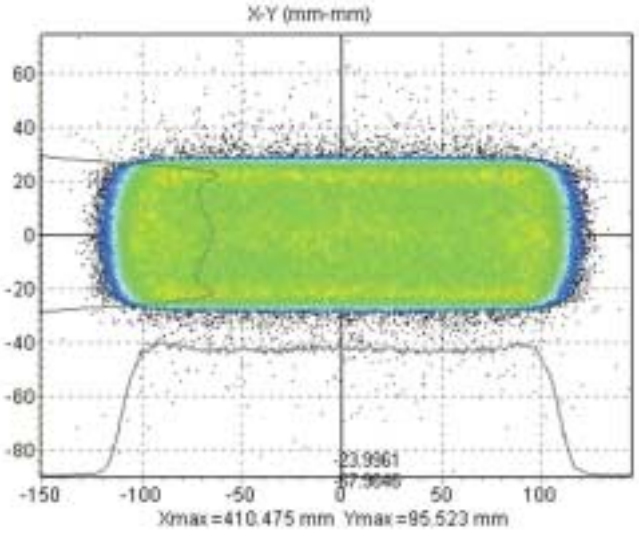


Champ magnétique axial de Silhi et modélisation de l'extraction d'un faisceau de protons H^+ (simulation effectuée avec le code Axcel développé en Allemagne).

Ces modélisations électromagnétiques couplées au transport du faisceau pour l'étude des faisceaux à basse énergie sont à l'origine de la définition et de l'optimisation de la source de protons H^+ Silhi, de la simulation du fonctionnement de Silhi en ions deutons chargés positivement (D^+), ainsi qu'à la définition du système d'extraction pour la source de D^+ du projet Spiral 2.

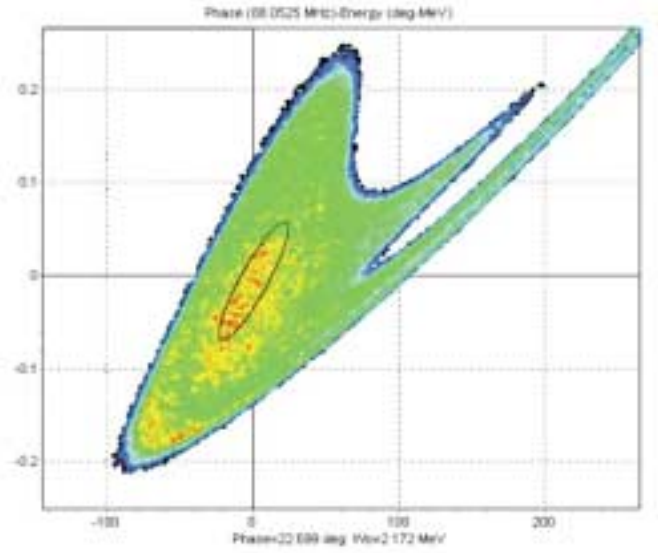
Dynamique de faisceau dans les linacs à ions de forte puissance

Parmi les laboratoires travaillant sur les accélérateurs linéaires à ions, le SACM a été impliqué dans de nombreux projets. Pour le projet de Source européenne de spallation (ESS), le SACM a conçu le linac des lignes de basse énergie jusqu'à l'injection dans l'anneau (lignes de basses énergies, quadripôles radiofréquences, lignes avec hacheur, partie de moyenne énergie à cavités conventionnelles, ligne funnel[3], partie de haute énergie à cavités supraconductrices), puis l'anneau de compression, et enfin la définition des tolérances pour la construction du linac (développement d'un *cluster*). Une étude similaire a été réalisée pour le projet Concert (installation multi- utilisateurs). Le même type de prestation a été fourni pour le projet Ifmif *(International fusion materials irradiation facility)*. Le SACM a réalisé le design des RFQ *(radio frequency quadrupoles)*, des DTL *(drift tube linacs)*, de la ligne à haute énergie avec homogénéisation de la densité, et a caractérisé les tolérances pour la construction.



Distribution transverse du faisceau sur la cible d'Ifmif après homogénéisation de la densité pour minimiser les gradients thermiques.

Dans le cadre de l'avant-projet sommaire puis de l'avant-projet détaillé de Spiral 2, le laboratoire a joué un rôle essentiel dans la conception du linac et a coordonné les activités de dynamique des faisceaux pour ce projet. L'expertise du SACM en conception et modélisation de RFQ a été sollicitée pour le projet RIA (source de noyaux exotiques pour la physique nucléaire) dans le cadre d'une mission de trois mois dans le laboratoire américain *National Superconducting Cyclotron Laboratory*. Cette collaboration a également permis au SACM de s'illustrer sur la première partie supraconductrice du linac pour des études d'instabilités qui ont validé les choix techniques (4 cavités par cryostats). La modélisation du faisceau à la traversée d'un aimant alpha[4] dans l'accélérateur Elsa (CEA-DAM) a permis d'étoffer la palette des codes de transports du SACM. Pour le projet de collisionneurs pour ions lourds Alice, le SACM est impliqué dans la modélisation du faisceau d'ions multichargés au travers du RFQ. Enfin, des études pour l'adaptation du RFQ d'Iphi aux besoins du SPL *(Superconducting proton linac,* Cern*)* pour une usine à neutrinos ont également été menées.



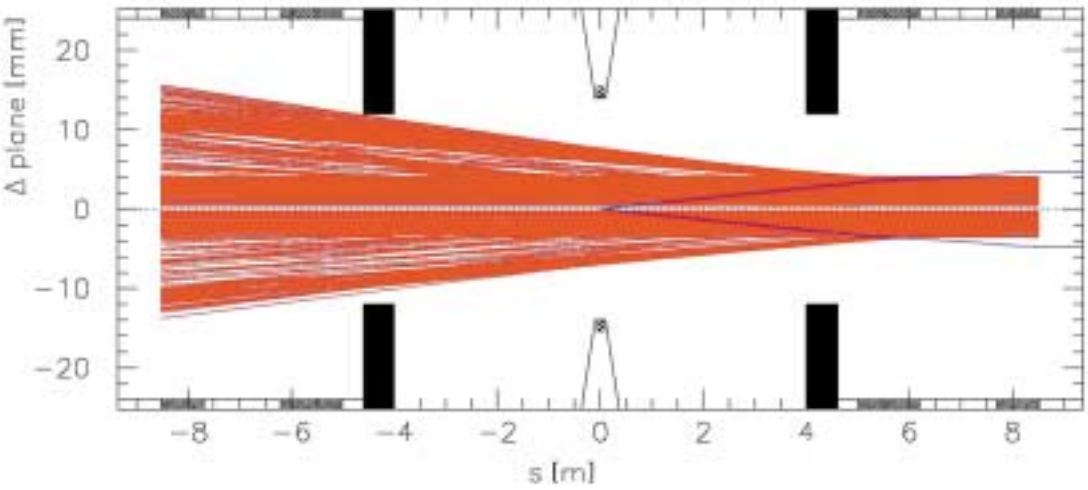
Isodensités dans l'espace des phases à l'entrée du linac supraconducteur de Spiral 2 décrivant la probabilité de perdre une particule dans le linac. On parle de l'acceptance du linac. L'ellipse noire représente le faisceau injecté.

Transport dans les lignes à haute énergie

Le système de focalisation finale du projet de collisionneur linéaire supraconducteur Tesla a été redessiné en intégrant un progrès récent venu du Slac *(Stanford linear accelerator center)* dans la conception optique de la compensation des aberrations chromatiques qui, en élargissant la tache du faisceau au point de collision, réduisent la luminosité. Cette nouvelle ligne a permis, d'autre part, d'intégrer le vœu des physiciens en charge de la conception du détecteur expérimental d'éloigner de 2 m le doublet final du point d'interaction.

Les contraintes de collimation du faisceau basées sur la libre propagation dans la région

d'interaction du rayonnement synchrotron émis dans les quadripôles du doublet final ont été recalculées en prenant en compte, pour la première fois, les déviations en énergie des particules du halo. Ceci a conduit à revoir la collimation des queues en énergie du faisceau et à améliorer la ligne de collimation placée en amont du système de focalisation.



Faisceau de rayonnement synchrotron (rouge) dans la région d'interaction de Tesla. Après collimation, il ne génère plus de paires e^+e^- (interaction rayonnement/matière) pouvant perturber l'acquisition.

Hadronthérapie. Source de rayonnement synchrotron de 4ème génération. Collection de muons pour une usine à neutrinos

Le SACM a participé à l'avant-projet technique (2000-2001) du projet Etoile d'hadronthérapie par ions légers, essentiellement carbone, basé sur un synchrotron (convention tripartite CEA/CNRS/Université Claude Bernard-Lyon). L'UCB-L a demandé début 2003 une expertise des projets allemand Hicat et italien CNAO, lesquels sont maintenant en phase de réalisation. Le but de cette expertise est de fournir les éléments techniques nécessaires pour répondre au cahier des charges d'Etoile.

Une source de rayonnement de 4ème génération a été étudiée par le laboratoire. Elle est basée sur un faisceau d'électrons d'une énergie de l'ordre du gigaélectronvolt produit par un accélérateur linéaire supraconducteur ; elle fournit du rayonnement stimulé ou spontané. Cette perspective de source nouvelle a fait l'objet d'une évaluation poussée dans le cadre d'un comité de la Direction des sciences de la matière du CEA, et a conduit au projet Arc-en-Ciel.

Le projet d'usine à neutrinos NuFact vise à produire des faisceaux de haut flux suffisamment collimatés, tirés en direction de grands détecteurs distants de centaines ou de milliers de kilomètres, à partir d'un anneau de stockage de muons à haute énergie. Le SACM collabore aux études de l'accélérateur dans le cadre de l'*European Neutrino Group* sur les questions de la collecte et de l'accélération des muons.

[1]Un nuage de particules chargées génère un champ électrique qui, selon le bilan des signes des charges et leur répartition dans l'espace, peut conduire à une force tendant à faire diverger le nuage. Cette force qui tend à faire s'éloigner les particules est la force de charge d'espace.

[2]L'émittance caractérise les dimensions de la zone occupée dans l'espace des phases par un faisceau de particules. Plus la divergence angulaire et sa taille sont petites, plus son émittance est faible.

[3]Une ligne funnel est un dispositif visant à produire un faisceau en en combinant deux afin notamment de doubler le courant moyen. Les paquets de particules des deux faisceaux primaires sont intercalés pour former un faisceau qui a une fréquence de répétition double.

[4]Un aimant alpha est un aimant dipolaire réalisant la séparation de particules ayant des quantités de mouvement différentes. Il porte ce nom car les trajectoires des particules dans l'aimant décrivent la lettre grecque alpha.

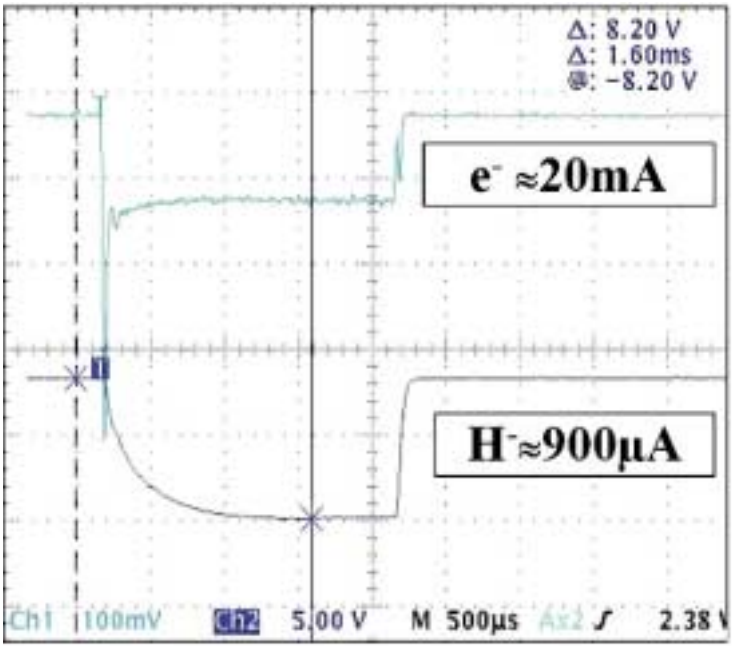
Développement de sources d'ions

La Source d'ions léger à haute intensité Silhi, développée dans le cadre du projet Iphi, a démontré son potentiel pour produire des faisceaux intenses de protons (H^+) avec de bonnes qualités optiques et une longue durée de vie. La source a fonctionné 160 heures à 100 milliampères avec une disponibilité de 99,9 %, prouvant ainsi sa fiabilité, fondamentale pour les applications envisagées pour Iphi. Forts de cette expérience, nous avons développé deux nouvelles sources basées sur le même principe : le plasma est généré par résonance cyclotronique des électrons (ECR) avec une onde radiofréquence de 2,45 GHz.

Pour le projet Spiral 2, une source destinée à la production de deutons (D^+) en mode continu a été conçue au SACM. Elle est en cours de construction et sera testée en 2004 sur la ligne de faisceau de Silhi. L'utilisation d'aimants permanents permet d'augmenter encore la fiabilité, réduit la consommation et facilite l'industrialisation. Le seul inconvénient est la rigidité de réglage : il faut changer les aimants ou les déplacer pour modifier leur influence. Le courant de la source de Spiral 2 est faible : 5 mA. Aussi, les tolérances de réglage sont suffisamment larges pour que l'utilisation des aimants permanents ne soit pas contraignante. Leurs avantages l'emportent alors largement, contrairement à la source Silhi pour laquelle les réglages nécessaires sont extrêmement précis. Le matériau choisi est le néodyme-fer-bore qui produit un fort champ magnétique avec un cycle d'hystérésis suffisant pour éviter la désaimantation : la durée de vie de ces aimants est largement supérieure à celle de la source.

En parallèle, l'étude d'une source d'ions hydrogène négatifs (H^-) travaillant en mode pulsé se poursuit. En 2001, des mesures spectrométriques ont montré, à l'intérieur du plasma, la présence de molécules d'hydrogène excitées capables de produire des ions H^- par attachement dissociatif. Les premiers ions ont été observés début 2002. En 2003, après déménagement de l'installation, la quantité d'ions H^- a été largement accrue en séparant la chambre plasma en deux parties avec une grille en inox. Le rôle de la grille est de réfléchir l'onde radiofréquence qui n'est pas absorbée par le plasma et en conséquence de limiter le chauffage des électrons dans la zone proche du trou d'extraction. En faisant varier simultanément le potentiel de la grille et celui de l'électrode plasma, on optimise l'énergie des particules qui entrent dans la zone dite de production et l'intensité d'ions négatifs augmente. Le courant maximum a atteint 900 µA d'ions H^- pour 20 mA d'électrons avec seulement 1 kW de puissance radiofréquence. Le but final est de produire plusieurs dizaines de mA à 50 ou 60 kV avec les qualités requises pour l'injecter dans le premier étage d'un accélérateur.

L'étude de la source d'ions négatifs est menée dans le cadre du réseau européen HP-NIS *(High performance negative ion sources)* qui regroupe 9 laboratoires européens. Le Dapnia/SACM est le coordonnateur de ce réseau dont le programme couvre la période janvier 2002 – décembre 2005.

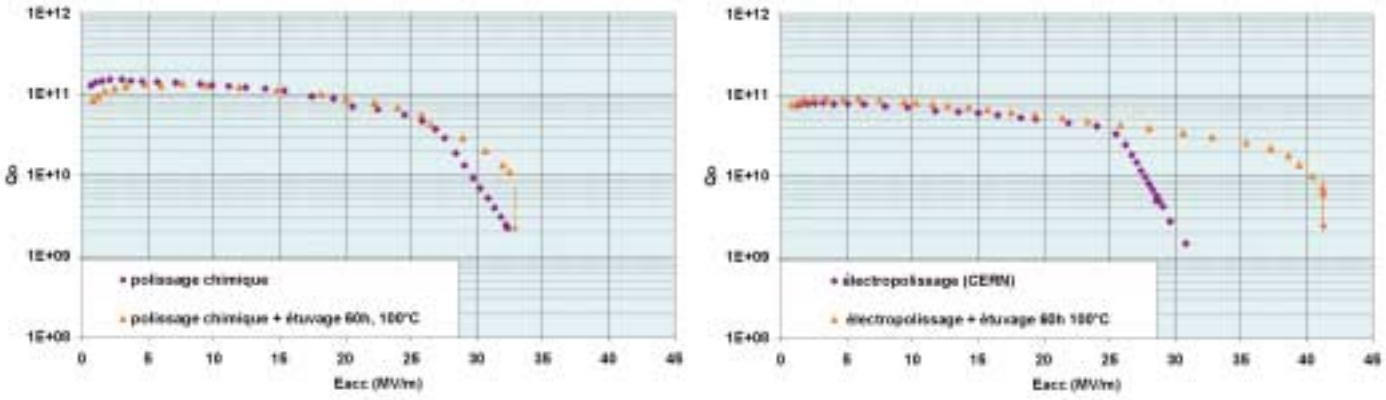


Signal observé sur un oscilloscope en polarisant la source à 10 kV pour extraire le faisceau. Les électrons et les ions négatifs sont séparés à l'aide d'un aimant dipolaire.

R&D en supraconductivité radiofréquence

La R&D autour des cavités radiofréquences supraconductrices vise à comprendre l'origine physique des limitations du champ électrique accélérateur de ces cavités, et trouver les traitements qui permettent d'améliorer leurs performances. Les défis à relever sont l'augmentation du champ électrique accélérateur (E_{acc} > 40 MV/m), qui permet de réduire la longueur de l'accélérateur, et l'augmentation du facteur de qualité ($Q_0 > 10^{10}$), c'est-à-dire du rapport de l'énergie stockée sur l'énergie dissipée dans les parois, ce qui permet de réduire la consommation cryogénique.

Performances ultimes des cavités en niobium



Effet d'un étuvage modéré sur une cavité polie chimiquement (à gauche) et électropolie (à droite).

Au cours de ces dernières années, nous avons montré que l'étuvage était une étape indispensable pour l'obtention de gradients accélérateurs élevés. Un étuvage à 110 °C pendant 60 h permet d'abaisser pratiquement d'un ordre de grandeur la résistance de surface donc les dissipations thermiques à haut champ, sans modifier la position du *quench* – transition de l'état supraconducteur à l'état conducteur – lorsque celui-ci est observé. Ce résultat est particulièrement spectaculaire pour les cavités qui ne sont pas limitées par un *quench* avant l'étuvage. Par exemple, les cavités électropolies n'ayant pas subi d'étuvage, sont actuellement limitées aux environs de 25-30 MV/m par un fort échauffement. Ces mêmes cavités ne peuvent atteindre des champs records supérieurs à 40 MV/m, limités par un *quench*, qu'après un étuvage. On peut donc dissocier les dissipations à haut champ du phénomène de *quench* qui est à présent la limite ultime.

Le problème actuel : comprendre le quench

Des courants de l'ordre de quelques 10^9 A/m^2 circulent dans la profondeur de pénétration du champ magnétique, c'est-à-dire pour le niobium, dans les 50-100 premiers nanomètres de la surface. La grande limitation actuelle est le « *quench* », instabilité thermique généralement attribuée à la présence d'un défaut localisé (de l'ordre de quelques 10 µm de diamètre) qui peut provoquer une augmentation localisée du champ magnétique ou de la température, et par conséquent entraîner la transition du supraconducteur à l'état normal. On sait que ce phénomène est influencé par le dernier traitement de surface effectué et nous explorons à l'heure actuelle trois voies susceptibles de l'expliquer.

Composition chimique de la surface

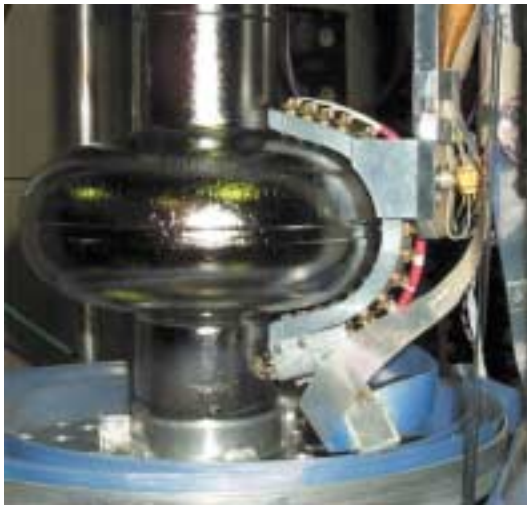
Les études de surfaces menées sur le niobium utilisé dans la fabrication des cavités montrent qu'il existe une concentration d'impuretés à l'interface oxyde-métal, c'est-à-dire précisément dans la région où ont lieu les dissipations. En particulier, lors d'une thèse menée en collaboration avec le Drecam, nous avons pu mesurer environ 200 fois plus d'oxygène à la surface qu'au cœur du matériau. L'oxygène est la principale impureté du niobium et pourrait être impliqué dans les phénomènes de dissipation à haut champ. Il est donc très important de pouvoir mesurer précisément sa distribution à la surface. Cette étude se poursuit avec le démarrage d'une thèse en collaboration avec le *Max Planck Institut* de Stuttgart.

Morphologie de la surface

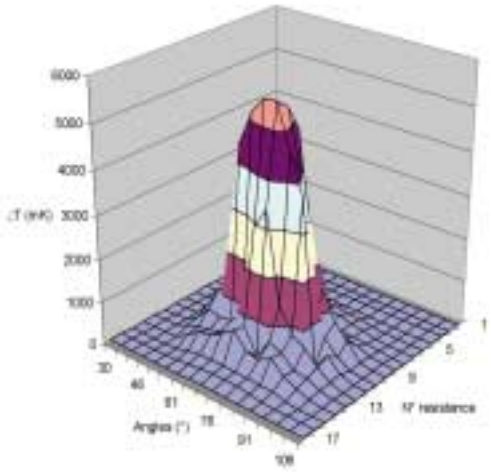
Un des modèles proposés implique une augmentation locale du champ magnétique sur les marches résultant de l'abrasion chimique des joints de grains. Jusqu'à présent il était difficile d'évaluer numériquement cet effet de façon correcte. Grâce à la combinaison d'une carte de température et d'une prise d'empreinte à l'intérieur de la cavité, on a pu pour la première fois faire un relevé exact de la région du quench et modéliser l'augmentation locale du champ magnétique et son influence sur les performances de la cavité. Les études morphologiques ont également montré que la zone thermiquement affectée par la soudure présente des hauteurs de marche (rugosité) environ 10 fois plus élevées que le reste de la cavité, à cause de la croissance exagérée des grains dans cette région. Si ces résultats se confirment, ils pourraient remettre en cause le mode de fabrication des cavités, car cette zone se situe là où le courant est le plus intense.

Etudes des joints de grain

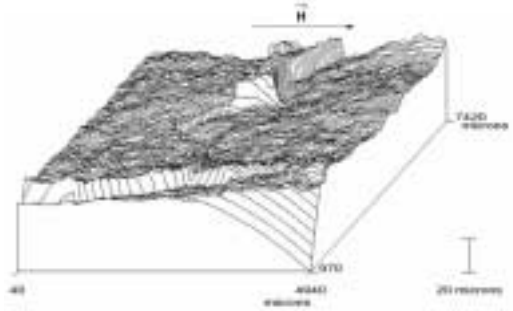
Un autre aspect particulier de la supraconductivité radiofréquence provient des joints de grains, qui peuvent présenter un comportement supraconducteur « affaibli ». Une expérience est en cours pour mesurer la résistance spécifique des joints de grains du niobium. La précision de la mesure doit être améliorée.



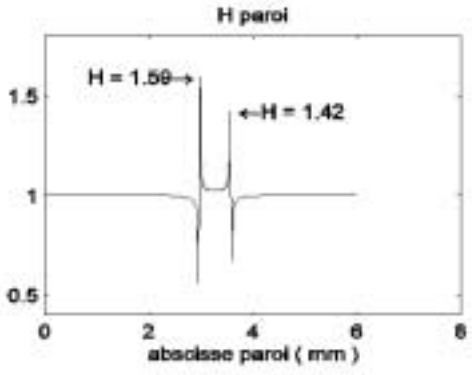
a



b



c



d

Les différentes étapes de l'étude morphologique : a) et b) localisation du quench à l'aide de sondes de température, c) mesure de la morphologie sur empreinte (profil redressé), d) modélisation de l'augmentation locale du champ due au relief observé.

Electropolissage ou polissage chimique

Dans le cadre d'une collaboration Desy/Cern/Saclay, un champ record de 42 MV/m a été obtenu sur une cavité préparée par électropolissage. Cette méthode permet de produire régulièrement des champs de l'ordre de 35-40 MV/m mais reste difficile à maîtriser. Cependant un champ de 40 MV/m ayant été obtenu de façon exceptionnelle à l'aide du procédé classique de polissage chimique, il est important de bien comprendre les mécanismes des différents traitements afin de pouvoir adopter en définitive la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Un travail est également en cours pour tenter d'améliorer les paramètres de l'électropolissage.

Instrumentation pour les accélérateurs de particules

Le développement de l'instrumentation et des composants radiofréquence (RF) concerne l'alimentation RF, les mesures sur le faisceau (moniteur de position de faisceau, profileurs de faisceau…), les boucles de régulation, et aussi la conception et l'intégration des accessoires des cavités, comme les coupleurs injectant l'onde radiofréquence et les systèmes d'accord à froid soumis à des contraintes thermiques et radiatives dues à l'environnement.

Alimentations de puissance radiofréquence

Un banc de puissance radiofréquence, de 704 MHz et 80 kW en continu, est en cours d'installation à Saclay. Il sera utilisé pour les tests de composants sur la station d'essais Cryholab. L'amplificateur de puissance est un tube à grille IOT *(inductive output tube).* Il est le plus puissant existant actuellement sur le marché ; il a été développé spécialement pour une utilisation sur les accélérateurs. L'alimentation électrique de 40 kV et 4 A est en place. Elle contient aussi les alimentations auxiliaires pour le chauffage, la polarisation et le focalisateur. Un préamplificateur de 500 W à transistors pilote l'entrée de l'IOT. Un tiroir de sécurité (détection d'arc, défaut de focalisation, etc) est installé mais pas encore testé. La sortie de l'IOT en guide d'onde est connectée à une charge coaxiale refroidie à l'eau via une transition ad hoc. Le circulateur et le court-circuit sont reçus mais pas encore installés. Le logiciel de pilotage du court-circuit mobile a été refait pour être piloté par Labview©.

Le matériel du LEP prêté par le Cern pour tester le quadripôle radiofréquence de Iphi est en phase d'installation dans l'ancien hall de Saturne à Saclay. L'alimentation 100 kV, 40 A, nécessaire pour alimenter les deux klystrons, est en cours de câblage. Le transformateur abaisseur de tension a été rebobiné pour s'adapter au réseau de 15 kV du centre de Saclay.

L'étude de l'interface nécessaire pour piloter l'alimentation du Cern à partir du système de contrôle-commande de Iphi est terminée.

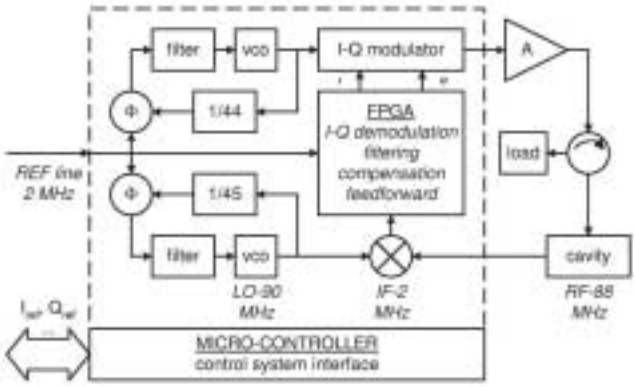
Electronique radiofréquence bas niveau et diagnostic faisceau

L'électronique bas niveau met en oeuvre les techniques de traitement du signal et de contrôle propres au fonctionnement des sous-ensembles d'un accélérateur : cavités accélératrices, moniteur de position de faisceau (BPM), protection de la machine, etc.

L'accélération des paquets de particules dans une cavité RF nécessite un asservissement en

Mise en place à Saclay des transformateurs de l'alimentation de 100 kV et 40 A destinés à l'alimentation des klystrons de Iphi.

amplitude et en phase de l'onde RF. Un système basé sur la technologie numérique a été étudié et proposé pour les projets Soleil et Spiral 2. Il apporte un niveau de flexibilité, d'intégration et de fiabilité supérieur aux systèmes analogiques antérieurs pour un moindre coût. Dans le cadre de l'installation TTF, le SACM fournit des BPM à haute résolution (10 µm) avec leur électronique, installés à l'extérieur comme à l'intérieur des cryomodules. Le diagnostic du faisceau inclut également une électronique rapide de mesure du courant pour la protection de la machine contre les pertes de faisceau.

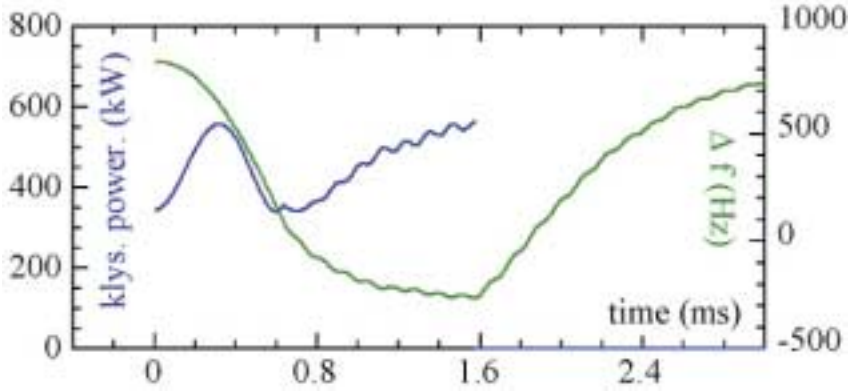


Asservissement numérique en amplitude et en phase proposé pour le projet Spiral 2.

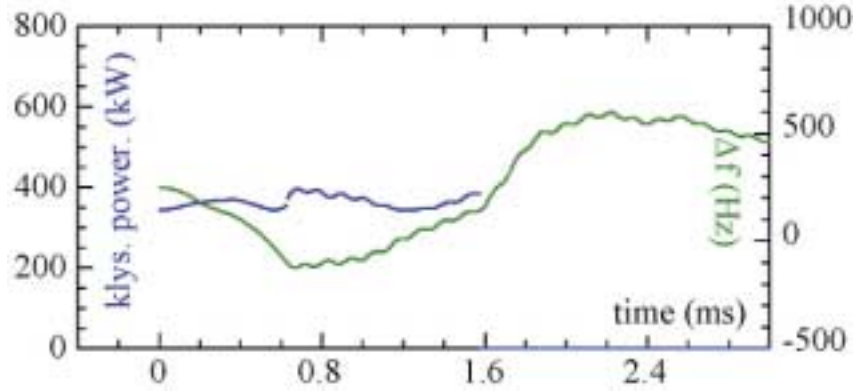
Compensation active piézoélectrique des forces de Laplace

En mode pulsé, les cavités supraconductrices opérant à fort gradient accélérateur subissent une déformation mécanique due aux forces de Laplace qui modifie leur fréquence de résonance. L'asservissement classique en amplitude et en phase requiert une puissance RF considérable, car une partie de la puissance incidente est réfléchie. Un système complémentaire de barreaux piézoélectriques peut contrebalancer cet effet en appliquant une déformation opposée, mais il faut d'abord déterminer le profil de tension à appliquer tout au long de l'impulsion RF.

En effet le couplage entre les caractéristiques mécaniques et les variations du champ radiofréquence induit un comportement complexe qu'il faut modéliser pour chaque cavité à partir de leurs données expérimentales individuelles. Nous avons développé cette modélisation et un outil de simulation pour prédire les performances et les limitations d'un tel système à partir des caractéristiques RF et mécaniques des cavités.



a) sans compensation active piézoélectrique.



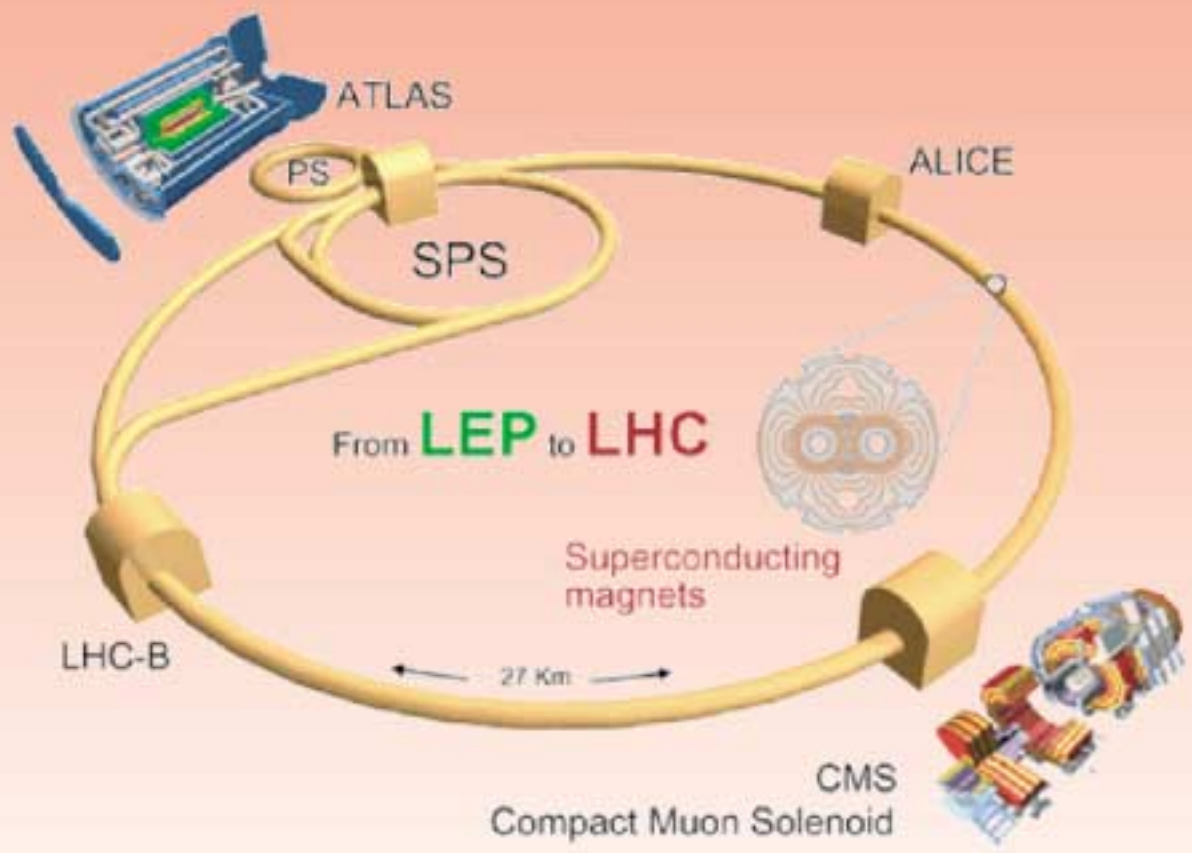
b) avec compensation active piézoélectrique.

Puissance RF requise et désaccord de la cavité Tesla à 35 MV/m.

Électroaimants supraconducteurs pour la physique des particules et la physique nucléaire

Le CEA est fortement impliqué dans les recherches qui seront menées au LHC (*Large hadron collider*), le futur accélérateur de particules du Cern, à Genève, qui permettra des collisions entre faisceaux de protons ayant chacun une énergie de 7 teraélectronvolts. Ce niveau élevé d'énergie requiert des champs magnétiques intenses et des dimensions gigantesques tant pour les aimants de l'accélérateur que pour ceux des détecteurs. Quatre cents aimants quadripolaires, développés par les ingénieurs du SACM, focaliseront les faisceaux de protons du LHC. En collaboration avec d'autres laboratoires, le service participe également à la conception et à la construction des deux grands détecteurs, Atlas (*A toroidal LHC apparatus system*) et CMS (C*ompact muon solenoid*), les plus grands et plus complexes jamais réalisés à ce jour.

En collaboration étroite avec le Service de physique nucléaire, le SACM participe à la conception d'ensembles cryomagnétiques pour des expériences à TJNAF aux Etat-Unis et GSI en Allemagne, respectivement Clas (*Cebaf large acceptance spectrometer*) et Glad (*GSI large acceptance dipole*).



Les quadripôles supraconducteurs pour le LHC

Dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France à la construction du 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 l'homogénéité de champ 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 et à une conception en vue d'une production industrielle de 400 unités. Sur la base des bons résultats obtenus par les trois prototypes réalisés au SACM et testés au Cern et au SACM en 2000, le SACM a assuré le transfert technologique de 2001 à mi-2003. Il assure actuellement le suivi de la fabrication des aimants de série confiée à l'industriel allemand Accel.

Une masse froide est une enceinte à hélium contenant trois aimants à double ouverture, un aimant quadripolaire principal et deux aimants correcteurs. Ces deux aimants correcteurs sont des fournitures extérieures, mais le Dapnia a étudié leur intégration dans la masse froide. Chaque aimant comporte deux ouvertures dans lesquelles circulent les particules de chaque faisceau.

Pour chacune de ces ouvertures quadripolaires de 56 mm de diamètre, quatre bobines supraconductrices sont frettées dans un ensemble commun de colliers 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. Le principe même de la conception nous permet de prévoir la position des câbles refroidis jusqu'à 1,9 K (-271°C) et alimentés par un courant de 13 000 A, ceci en dépit des retreints thermiques et des forces de Lorentz qui tendent à faire éclater les ouvertures et écraser les bobines. Les prototypes avaient ainsi permis de confirmer que la géométrie restait mécaniquement stable malgré des efforts équivalents au poids de l'empilement d'une centaine de voitures.

Transfert de technologie vers l'industrie

Afin d'industrialiser la production, Accel s'est équipé de machines d'outillage supplémentaires, parfois modifiées par rapport à nos outillages prototypes. L'étape la plus délicate a été d'obtenir des bobines régulières du fait de ces nouveaux outillages et du changement de la nuance du matériau isolant les bobines, imposée par le Cern. Pendant la période du transfert de technologie vers l'industrie, deux techniciens SACM en poste chez l'industriel Accel ont veillé à la qualification des outillages, ont expliqué le fonctionnement des machines de fabrication, ont fait appliquer les diverses procédures rédigées au SACM et fait respecter leur application par toutes les équipes de fabrication ; ils ont transmis les détails de leur savoir-faire.

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

Suivi de la réalisation industrielle

La phase de suivi de fabrication est assurée par un technicien SACM chez Accel une semaine sur deux, l'analyse de détail étant faite par des

Masse froide de série devant son enceinte de test sous pression (photo Accel). Avant la livraison au Cern, Accel contrôle que chaque masse froide supporte une pression interne de 26 bars et est étanche à l'hélium jusqu'à 10^{-10} mbar.L.s^{-1}.

ingénieurs du SACM. Les masses froides sont contrôlées chez l'industriel aux principales étapes de la fabrication : durant et après le bobinage et lors du frettage. La finesse des mesures magnétiques en fait un instrument privilégié de détection de défaut. Un banc automatisé a été spécialement développé sur la base du système d'acquisition conçu par le Cern. Il est installé chez l'industriel et détecte la plupart des erreurs de mesures et les défauts du système.

Originalité du système de qualité mis en place

Un système de contrôle qualité a été mis en place dès le début de la conception pour le dossier de plans de fabrication des prototypes, puis à toutes les étapes ultérieures. L'outil principal du suivi de fabrication est le système de gestion des non-conformités avec trois objectifs : pouvoir réagir rapidement si un défaut est détecté à chaque étape de la fabrication jusqu'aux tests d'acceptation à froid au Cern, disposer de l'historique des masses froides durant les vingt années d'exploitation du LHC, et plus généralement inciter l'entreprise à respecter une démarche qualité.

Sachant que nous avons un délai de trois mois entre la fabrication et le test d'un aimant, cela correspond à la production d'une quarantaine de masses froides. Toute déviation doit être connue et analysée pour prendre des mesures correctives adaptées le plus tôt possible. Pour réduire les incertitudes, un aimant quadripolaire principal sur dix est testé seul. Cette procédure a permis de vérifier dès juillet 2002 que le transfert industriel s'était correctement effectué.

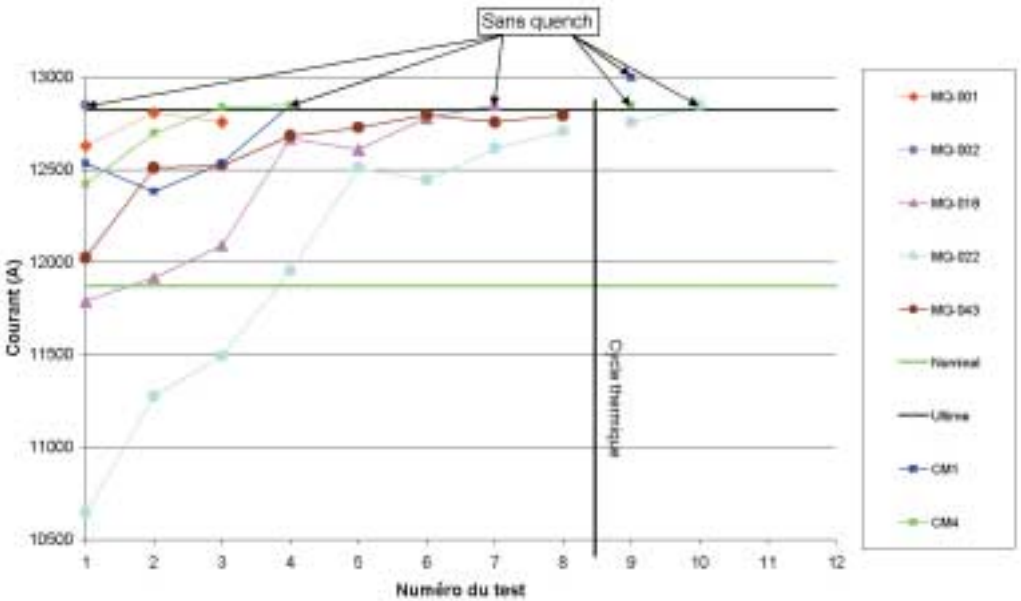
Des contrôles d'acceptation électriques, magnétiques, géométriques, d'étanchéité et de résistance à la pression sont effectués sur la masse froide avant sa livraison au Cern et des rapports sont rédigés. Afin de rendre la production aussi fluide que possible, tous ces tests sont faits par l'entreprise qui vérifie la validité des résultats par rapport aux bornes définies par le SACM. Toute déviation entraîne un rapport de non-conformité et la mise à l'écart de l'objet pendant son analyse par le SACM. La livraison au Cern de chaque masse froide est suspendue à l'accord du SACM après vérification de la validité de tous les tests et des non-conformités.

Tests des quadripôles de série au Cern

Tête de file d'une série d'environ 400 unités, le premier quadripôle a été refroidi seul en juillet 2002. Alors que le courant nominal est de 11870 A, l'aimant a eu son premier *quench* à 12631 A et son second à 12808 A, atteignant ainsi un courant correspondant au fonctionnement de la machine LHC avec un champ magnétique de 9 T dans les dipôles. Il faut, de plus, signaler que ces *quenchs* sont apparus non pas dans l'aimant, mais au niveau des connexions avec la station d'essai. L'aimant a donc atteint son courant « ultime » sans montrer de défaillance, dépassant ainsi les résultats obtenus par les prototypes.

En octobre 2003, la première masse froide de série a aussi été testée avec succès. Depuis, cinq autres quadripôles, seuls ou dans une masse froide, ont été testés.

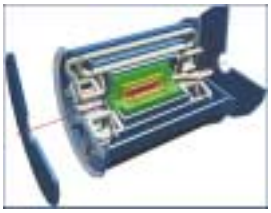
La réussite de ces premiers essais met en évidence la qualité et la robustesse de la conception assurée par le Dapnia et donne confiance dans la réussite de la fabrication de série.



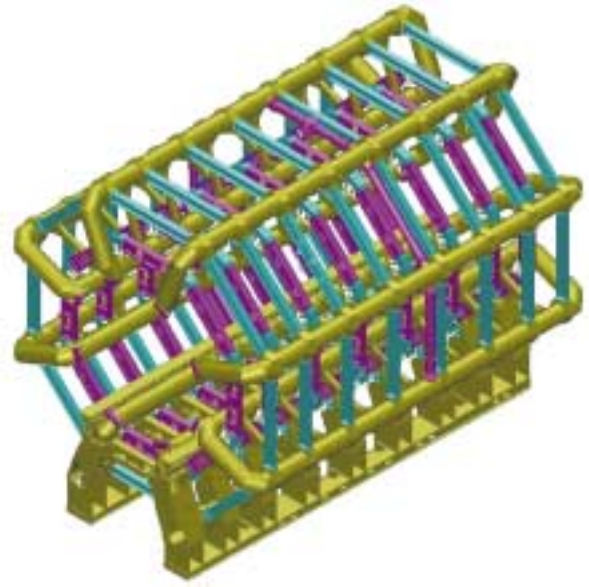
Détails des transitions* (quenchs) *dans les premiers aimants de série. Chaque aimant subit un cycle thermique (1,8 K – 300 K – 1,8 K) pour vérifier s'il garde la 'mémoire' de ses performances antérieures.

MQ : un aimant quadripolaire seul
CM : une masse froide (un aimant quadripolaire principal + les aimants de correction)
Courant nominal : 11870 A (correspond à un gradient de champ de 223 T/m)
Courant ultime (celui au-dessus duquel on ne monte pas) : 12850 A

L'aimant toroïdal pour le détecteur Atlas



Le système magnétique du détecteur Atlas pour le LHC comprend un aimant toroïdal central, constitué de huit bobines supraconductrices, deux aimants toroïdaux d'extrémité de fermeture du champ et un solénoïde central. Le Dapnia est responsable de la conception et du suivi industriel du toroïde central dans le cadre d'un accord de collaboration avec le Cern depuis 1996. Après la réalisation et le test en 2001 d'une bobine prototype, les bobines définitives de l'aimant toroïdal ont été réalisées au Cern à partir de composants fournis par de nombreux industriels européens. De 2000 à 2003, le Dapnia a assuré le suivi industriel de la fabrication de la plupart des composants et le suivi technique de leur assemblage au Cern.

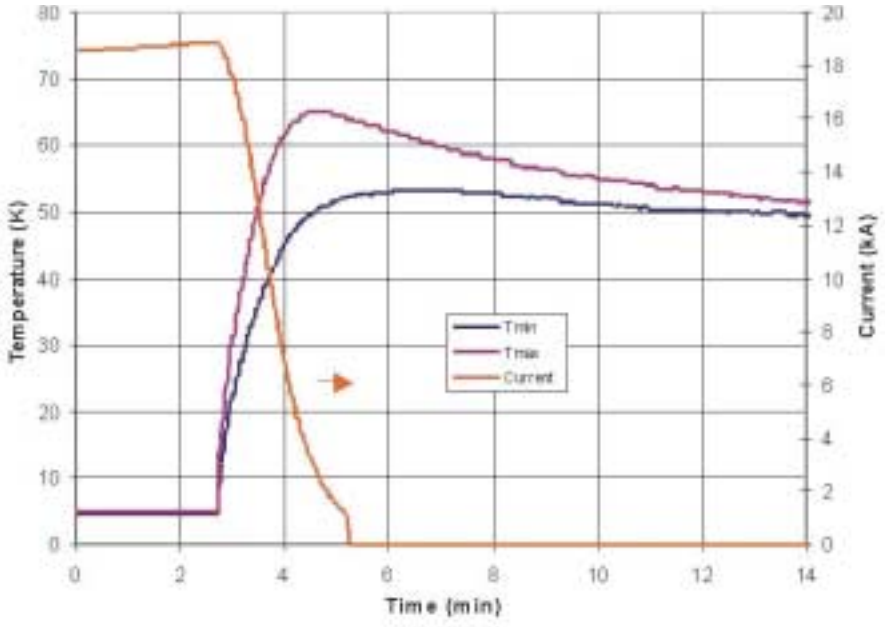


Vue générale du toroïde central : diamètre intérieur = 9,4 m ; diamètre extérieur = 20,1 m ; longueur = 25,3 m ; énergie stockée = 1080 MJ.
En jaune : les huit bobines supraconductrices dans leurs cryostats (8 x 87 tonnes).
En fushia et turquoise : la structure mécanique chaude reliant les bobines entre elles.

Test de la bobine prototype B0

Avant de construire le détecteur Atlas, un prototype de longueur 1/3 d'une des huit bobines, la bobine B0, a été réalisé en 1999 en utilisant au maximum les composants et les modes d'assemblage prévus pour les bobines définitives. Cette petite bobine de la taille d'un autobus londonien a validé les choix technologiques envisagés pour la construction du détecteur final concernant aussi bien les aspects mécaniques que les aspects thermiques et électriques.

Nous avons refroidi deux fois cette bobine au Cern courant de l'année 2001 afin d'en tirer le maximum d'information. Il faut rappeler que lors du refroidissement de 20 °C à - 269 °C la bobine se contracte de plus de 3 cm alors que l'enceinte externe ne bouge pratiquement pas. Pour simuler les forces d'attraction entre les bobines du toroïde lorsqu'elles sont parcourues par le courant nominal de 20,5 kA, nous avons placé B0 le long d'un bloc de fer qui agit comme un miroir magnétique en produisant une force d'environ 500 tonnes.



Test de la bobine prototype B0 : accroissement de la température dû à une décharge rapide à partir de 19 kA.

Le courant dans la bobine a été monté à la limite de l'alimentation électrique, soit 24 kA, c'est-à-dire 17 % au-dessus du courant nominal. Nous avons beaucoup appris sur la stabilité de l'aimant : les vitesses de propagation d'une zone résistive, l'énergie critique pour la créer.

Les problèmes rencontrés lors de ces essais nous ont conduits à modifier le design – par exemple celui de la sortie des conducteurs – pour les bobines définitives. Enfin, nous avons validé le procédé de refroidissement et les procédures de défauts : panne du réseau électrique, changement de distribution de l'hélium …

Construction des masses froides de l'aimant toroïdal

Le toroïde central utilise 32 longueurs unitaires de conducteur de 1730 m. Un accent particulier a été mis sur les contrôles en ligne chez l'industriel lors de l'extrusion de la matrice en aluminium qui entoure le câble supraconducteur. La taille et le profil du conducteur ont été mesurés tous les 30 cm au moyen de deux paires de micromètres lasers. La détection de décohésions locales à l'interface du câble et de l'aluminium, dues à la présence de grandes quantités d'oxyde de cuivre, a été mesurée par le biais d'un *phased array system* (PAS) composé de deux sondes ultrasoniques.

Le conducteur (12 mm x 57 mm) est constitué d'un câble supraconducteur co-extrudé dans une matrice d'aluminium de haute pureté. Son courant nominal est de 20,5 kA et le champ maximal sur le conducteur de 3,9 T. Les brins composant le câble sont constitués de filaments en NbTi de 50 µm de diamètre noyés dans une matrice de cuivre.

Le bobinage et l'imprégnation des huit bobines ont été faits chez Ansaldo (Gênes, Italie). Afin de garder un compactage suffisant du bobinage, une tension de 3000 N est appliquée sur le conducteur entouré de son isolation durant toute l'opération de bobinage, arrêts et démarrages compris. A cause de ses grandes dimensions, il n'est pas possible de mettre le bobinage dans un autoclave pour l'imprégnation finale ; aussi le concept d'une chambre expansible a été développé, faite de panneaux de tôles d'aluminium de 2,5 mm d'épaisseur soudés autour du bobinage. Une attention spéciale a été portée sur la soudure pour minimiser le taux de fuite qui, basé sur l'expérience du prototype B0, doit être inférieure à 10^{-2} mbar.L.s^{-1}. Après un dégazage, la procédure d'imprégnation commence avec l'injection de la résine époxyde. La température nécessaire pour l'imprégnation est obtenue par le chauffage de la bobine en y faisant circuler un courant continu de 500 A.

Retournement d'un bobinage dans sa boîte à bobine lors de la construction d'une masse froide.

Pour l'intégration des masses froides, une technique d'assemblage a été développée afin de prendre en compte les importantes forces magnétiques appliquées sur le conducteur. Chaque bobinage est inséré dans une boîte à bobine, support mécanique du bobinage, et précontraint à l'aide de baudruches travaillant comme des cales expansibles. Ces baudruches sont tout d'abord remplies de billes de verre et d'argon gazeux, puis le gaz résiduel est évacué et remplacé par de la résine époxyde, de faible viscosité et de longue durée de vie, injectée à 2 bars. La polymérisation de la résine s'effectue en montant la température de la bobine jusqu'à 70 °C au moyen d'un courant dans le conducteur, puis en augmentant la pression dans les baudruches jusqu'à 125 bars. Un palier final à 125 °C est maintenu pendant trente heures pour compléter la polymérisation. La dernière des huit masses froides a été assemblée au Cern en octobre 2003.

Intégration des masses froides dans leurs cryostats

L'enceinte à vide d'une bobine est un tube de 1,1 m de diamètre en forme d'hippodrome de 25 m de long. Elle est constituée de plaques de 10 mm d'épaisseur en acier inoxydable roulées et soudées. Les tolérances dimensionnelles sont inférieures à 5 mm sur toute la longueur, ce qui représente un défi technique pour ce type de fabrication. Fin 2003 sept enceintes à vide ont été livrées au Cern et la huitième le sera en 2004.

Installation des biellettes sur la masse froide.

La masse froide est supportée à l'intérieur de l'enceinte à vide par 8 biellettes et 32 butées. Les biellettes, réalisées dans un alliage de titane *extra low interstitial*, supportent les forces magnétiques en traction et autorise, en flexion, le déplacement de 45 mm de la masse froide dû au refroidissement. Après l'usinage final, les biellettes sont testées à 4,2 K jusqu'à la charge d'épreuve de 250 t. Les butées sont fabriquées à partir de deux tubes en matériau composite (fibre de verre et résine époxy). Un des tubes (virole chaude) relie l'enceinte à vide à l'écran thermique à 80 K, l'autre (virole froide) relie l'écran à la masse froide. Pour autoriser le déplacement de la masse froide à 4,5 K, une sphère recouverte d'une projection de téflon est placée entre les deux viroles ; sa géométrie a été optimisée pour réduire les concentrations de contrainte et les éventuelles dégradations du revêtement.

Trois zones de travail sont utilisées durant l'intégration d'une masse froide dans son cryostat. Les opérations démarrent avec le collage des lignes de refroidissement composées de deux circuits redondants. Les biellettes et les butées cryogéniques sont installées à cette étape. Les capteurs de température, de tension et de contrainte sont alors mis en place, suivis des écrans thermiques et de la superisolation. Après cette opération, la masse froide est insérée dans l'enceinte à vide qui est alors fermée et soudée. Des contrôles géométriques précis sont faits tout au long des opérations d'intégration pour préparer le positionnement final des bobines dans la caverne.

Au début de l'année 2004, deux masses froides seront équipées de leurs écrans thermiques et la première enceinte à vide devrait être fermée en juin 2004. La première bobine du toroïde sera alors prête à être testée.

Butée cryogénique prête à être testée en compression et en flexion. Entre les deux viroles en matériau composite, la supérieure qui sera reliée à l'enceinte à vide chaude (300 K) et l'inférieure à la masse froide (4,8 K), est visible la sphère téflonisée qui autorisera le déplacement dû au refroidissement.

Intégration au Cern du premier écran sur la masse froide. Chaque écran est composé de 22 sections indépendantes faites de 4 panneaux d'aluminium de 5 mm d'épaisseur rivetés ensemble. L'écran est fixé par des supports provisoires (cylindres blancs). Les supports définitifs ne seront installés que lorsque les circuits de refroidissement auront été soudés et testés.

Maquette à l'échelle 1 de la manchette coulissante qui permettra les connexions électriques et cryogéniques entre l'anneau cryogénique et la bobine.

Conception de l'anneau cryogénique

L'anneau cryogénique est une contribution en nature du CEA/Dapnia à la collaboration Atlas. Les années 2002 et 2003 ont été essentiellement consacrées à sa conception. Le rôle de l'anneau cryogénique est de distribuer les fluides cryogéniques (hélium gazeux et hélium liquide) et la puissance électrique aux 8 bobines. Le courant est amené aux bobines via des *busbars* (liaisons supraconductrices entre les amenées de courant et le bobinage) refroidis par de l'hélium diphasique à 4,8 K et 1,4 bars. L'anneau cryogénique est divisé en huit secteurs de 6 m de long, situés entre les bobines sur le rayon externe du toroïde. Chaque extrémité de secteur est équipée d'une manchette coulissante qui permettra les connexions électriques et cryogéniques à la bobine pendant l'assemblage final du toroïde. La réalisation se fera au CEA en 2004. Le premier secteur inférieur doit être livré au Cern en septembre 2004.

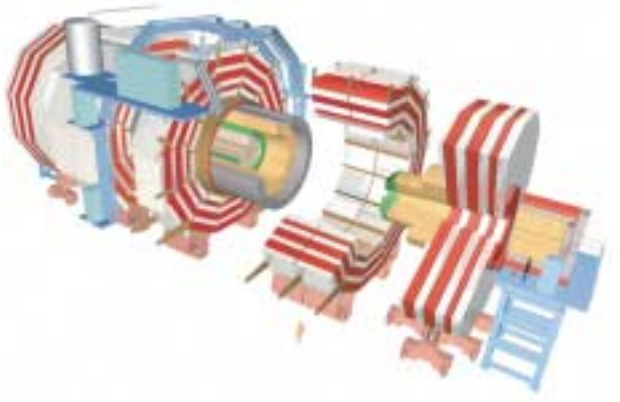
Etude de la structure chaude et de l'assemblage en caverne

La structure chaude, autre pièce majeure pour l'assemblage du toroïde, est la structure mécanique qui relie les bobines entre elles. Huit anneaux de voussoirs et de boîtes de connexions en aluminium (section 850 mm x 500 mm) et d'entretoises (section 600 mm x 400 mm) supportent le poids de l'aimant et des chambres à muons attachées aux enceintes à vide. Durant la mise sous courant des bobines une force centripète de 1200 t s'applique sur chaque masse froide. Cette force est transmise à la structure chaude via les biellettes. Le premier prototype de voussoirs et de boîtes de connexion doit être prêt courant février 2004.

Le scénario détaillé de l'assemblage est maintenant défini. L'assemblage final doit commencer en juin 2004 et durer plus d'une année.

Le solénoïde supraconducteur pour le détecteur CMS

Le Dapnia est responsable de la conception générale du solénoïde de l'expérience CMS *(Compact muon solenoid)* du projet LHC *(Large hadron collider)*, au travers d'un accord de collaboration avec le Cern depuis 1996. Au sein du Dapnia, le SACM intervient comme service pilote du projet pour les aspects de conception magnétique et thermique de l'aimant, pour la supervision de l'assemblage et des essais en surface au Cern, aidé du Service d'ingénierie des systèmes pour les aspects de la conception mécanique, de l'instrumentation et du suivi de la réalisation dans l'industrie. Outre sa taille, les particularités de ce solénoïde sont le conducteur renforcé par un alliage d'aluminium et la conception d'un bobinage par l'intérieur d'un cylindre. Les années 2001 à 2003 ont vu le projet passer de la phase de fin d'études à celui des réalisations et du début de l'assemblage, et ont permis de tester un certain nombre de composants critiques avant leur utilisation dans l'aimant.



Le solénoïde supraconducteur (en gris) au centre du détecteur CMS.
Le champ magnétique au centre du solénoïde est de 4 T, la longueur du solénoïde est de 12,5 m pour un diamètre intérieur de 6 m. L'énergie stockée est de 2,7 GJ. Sa masse est de 220 tonnes. Il est réalisé en cinq modules de 2,5 m de longueur.

Etude de la masse froide et réalisation de ses composants

Après que la conception générale de la masse froide a été entérinée lors d'une revue technique de la collaboration en décembre 1998, les actions classiques d'étude et de réalisation ont été menées :

- finalisation des dessins de détail ;
- écriture des spécifications techniques et réalisation des appels d'offre via le Cern ;
- choix des contractants (avec le Cern) ;
- suivi de la réalisation jusqu'à la réception.

Pratiquement, le SACM a la responsabilité technique et pilote les sous-ensembles suivants réalisés chez des industriels européens, ou des pays faisant partie de la collaboration, qui ont été impliqués très tôt dans les études de détail :

- le système de suspension, constitué de trente tirants en titane réalisés en Russie ; sa réception a été prononcée en septembre 2003 ;
- la cryogénie de proximité ; la réalisation est en cours et la réception est prévue en février 2004 ;

Un des cinq modules du bobinage en cours de réalisation chez la firme Ansaldo Superconduttori.

- les écrans thermiques réalisés en Italie ; les écrans internes ont été installés au Cern en septembre 2003, les écrans externes seront installés au 3ème trimestre 2004 ;
- les amenées de courant réalisées en France ; elles ont été montées et testées à Saclay au 3ème trimestre 2003 ;
- le système de pompage confié à une société allemande ; la réception est prévue mi-2004.

Le SACM a participé au suivi industriel du bobinage, réalisé en Italie par la société Ansaldo Superconduttori, sous la responsabilité de l'INFN *(Istituto nazionale di fisica nucleare)* de Gênes. Fin 2003, les cinq modules constituant le bobinage étaient

réalisés à 60 %. Le SIS est responsable de l'instrumentation interne et du système de diagnostic de l'aimant et participe activement aux systèmes de contrôle et de sécurité de l'aimant.

Caractérisation et qualification de certains éléments critiques

Les stations d'essais du SACM sont utilisées pour caractériser et qualifier un certain nombre d'éléments de la masse froide. On peut citer en particulier :

- la mesure du courant critique de brins extraits du conducteur à différents stades de sa fabrication ;
- la caractérisation de la tenue mécanique de la résine d'imprégnation en fonction de l'état de surface du conducteur ;
- la caractérisation à froid et à température ambiante de deux types d'alliage de titane au laboratoire d'essais mécaniques pour la réalisation des tirants de suspension ;
- l'adaptation d'une station d'essais pour tester la totalité des tirants en conditions mécaniques à 110 % de leur charge, et en conditions thermiques réelles, ceci après avoir testé deux prototypes de tirants.

Amenées de courant du solénoïde prêtes à être insérées dans le cryostat d'essai pour être testées.

Par ailleurs, on a adapté ou développé des installations spécifiques :

- une station d'essais pour tester des jonctions électriques sous champ magnétique jusqu'à 10 kA ; deux jonctions prototypes d'environ 1 m de long ont présenté une résistance d'environ 0,9 nΩ sous 2 teslas et 0,6 nΩ sous champ nul ;
- une station d'essais pour tester les amenées de courant à leur régime nominal (20 kA), avec et sans refroidissement ;
- un certain nombre de maquettes réalisées à Saclay pour faciliter l'assemblage final, comme la maquette d'introduction des tirants.

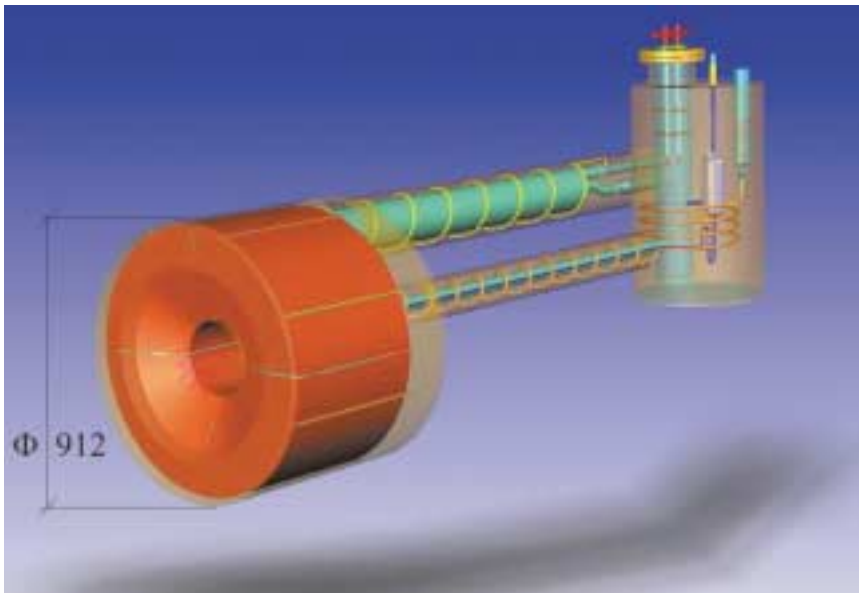
Montage de la masse froide

Le scénario d'assemblage du solénoïde a été étudié en 2001 puis validé par un bureau de contrôle extérieur. Les cinq modules du solénoïde seront assemblés verticalement, pour constituer la masse froide finale. Une grande plate-forme conçue au Dapnia et construite en Corée du Sud leur servira de support. La plate-forme pivotera pour faire basculer la bobine dans sa position finale horizontale où elle ne tiendra plus que par l'une de ses extrémités. L'enceinte à vide externe sera ensuite translatée horizontalement pour y insérer la bobine. Pendant l'été 2002, cette plate-forme a été testée avec succès, en utilisant l'enceinte à vide interne lestée pour simuler la masse froide.

Test au Cern de la plate-forme de montage de la masse froide du solénoïde CMS, utilisant l'enceinte à vide comme charge. La plate-forme servira à basculer le solénoïde de la position verticale à la position horizontale après montage.

Le solénoïde supraconducteur pour le détecteur Clas de l'expérience DVCS

Dans le cadre des collaborations avec le Laboratoire Thomas Jefferson aux États-Unis, le Dapnia s'est engagé à étudier et réaliser un solénoïde supraconducteur pour l'expérience DVCS *(Deeply virtual Compton scattering)* qui prendra place à Newport News en Virginie, courant 2004. Cet aimant sera utilisé au centre du champ toroïdal créé par les six aimants du détecteur Clas *(Cebaf large acceptance spectroneter)*. L'originalité de ce projet tient à ce que, pour annuler les forces d'interactions entre les deux aimants, une bobine solénoïdale de correction a été adjointe au solénoïde principal, ce qui a pour effet de réduire considérablement les effets du champ magnétique



Enceinte à vide du solénoïde (Ø 912 mm) au bout du séparateur de phase (tubulures supérieures) et du tube d'alimentation en hélium et en électricité (tubulures inférieures) raccordés à la boîte de jonction.

Le Service de physique nucléaire (SPhN) a la maîtrise du cahier des charges pour l'expérience DVCS, le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme (SACM) est le service pilote pour la réalisation de l'ensemble et le Service d'ingénierie des systèmes (SIS) a la charge de la conception mécanique et des baies de contrôle.

En 2002, les études menées conjointement par le SACM et le SPhN ont abouti à l'architecture actuelle de cet aimant. Le champ magnétique au centre est de 4,5 T dans une ouverture de 230 mm, le champ extérieur à l'enceinte à vide est inférieur à 3 10^{-3} T à partir du diamètre 912 mm, le courant nominal est de 550 A et l'aimant fonctionne en hélium liquide à 4,2 K. Le SACM a affiné les études magnétiques jusqu'à la simulation de la trajectoire des particules qui sont déviées dans le champ magnétique. Nous avons parallèlement fait les études thermiques et l'ensemble des plans de l'installation cryogénique. Le SIS a commencé les études mécaniques, électrotechniques et électroniques.

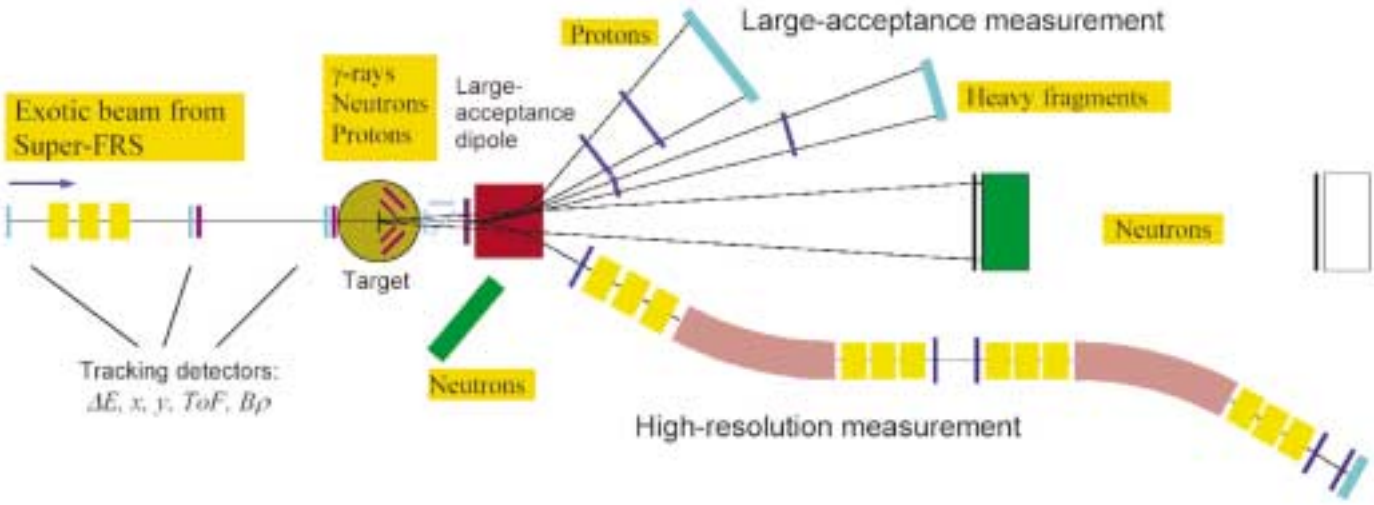
En 2003, le SACM a réalisé le bobinage des deux solénoïdes, leur assemblage final et les premières mesures magnétiques à chaud. Le SIS a assuré la réalisation des mandrins, les études mécaniques et les appels d'offres pour les enceintes du cryostat et la réalisation des baies d'électronique.

L'assemblage du cryostat, les essais à 4,2 K à Saclay et la mise en service à Newport News de l'aimant sont prévus en 2004.

Solénoïde en cours de bobinage à Saclay.

Le dipôle supraconducteur R3B-Glad

La collaboration européenne R3B *(Reactions with relativistic radioactive beams)* met en place un programme consacré à la physique émergente des ions lourds radioactifs. Parmi les installations de physique nucléaire européennes ou dans le monde capables de produire des faisceaux exotiques, le laboratoire du GSI *(Gesellschaft für Schwerlonenforschung)* à Darmstad en Allemagne est actuellement le seul accélérateur où peuvent être réalisées des expériences utilisant des faisceaux radioactifs aux énergies relativistes. Au cours des dix dernières années, les réactions sur cible fixe des faisceaux secondaires de haute énergie sont apparues comme de puissants outils pour explorer les propriétés des noyaux atomiques loin de la stabilité, et en extraire les données spectroscopiques détaillées. Le niveau d'énergie exigé par ces faisceaux exotiques relativistes (1 GeV par nucléon) nécessite la construction d'installations expérimentales aux performances nouvelles. Au sein de l'ensemble de détection, le spectromètre de grande acceptance Glad *(GSI large acceptance dipole)*, conçu par le Dapnia, assure en particulier la transparence totale au large cône de neutrons issu de la cible.

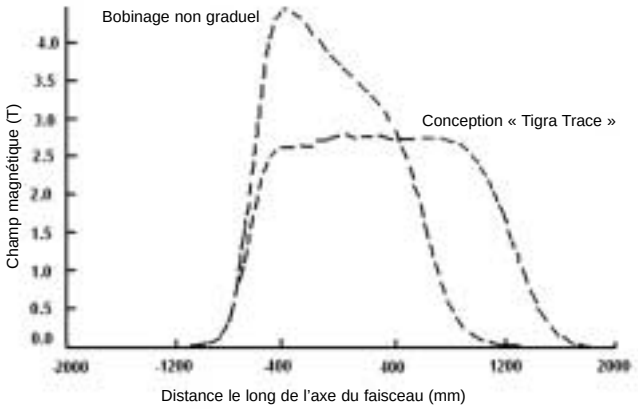


Infrastructure expérimentale.

Financée par le 5ème programme cadre de recherche et développement (5ème PCRD), l'étude de conception du projet de spectromètre supraconducteur de grande acceptance a été réalisée entre 2001 et 2002. Afin de répondre à d'ambitieuses spécifications expérimentales, une grande acceptance et une intégrale de champ élevée sont associées à un très faible champ de fuite (inférieur à 20 mT à 0,30 m de la face d'entrée du dipôle), spécialement autour de la cible où seront placés des détecteurs. Une séparation efficace des trajectoires des fragments lourds et des protons, facilitant l'analyse en impulsion des particules, est également assurée.

Conçu sur le principe du blindage actif, cet aimant au design innovant est constitué de quatre bobines supraconductrices *(*design "Tigra Trace": *Tilted and graded trapezoidal racetrack coils)*. Les deux bobines principales en forme d'hippodrome trapézoïdal sont inclinées verticalement - et les bobines latérales de blindage, horizontalement - afin de minimiser le volume et l'énergie stockée, et ainsi assurer l'acceptance angulaire requise pour les faisceaux spécifiés, tout en maintenant le champ de fuite à un faible niveau. Le nombre de spires des bobines est graduel afin d'obtenir un plateau de champ magnétique à 2,7 T dans la zone

Ensemble des quatre bobines « graduées ». L'ouverture en aval a une largeur de 1,20 m et une hauteur de 0,60 m.

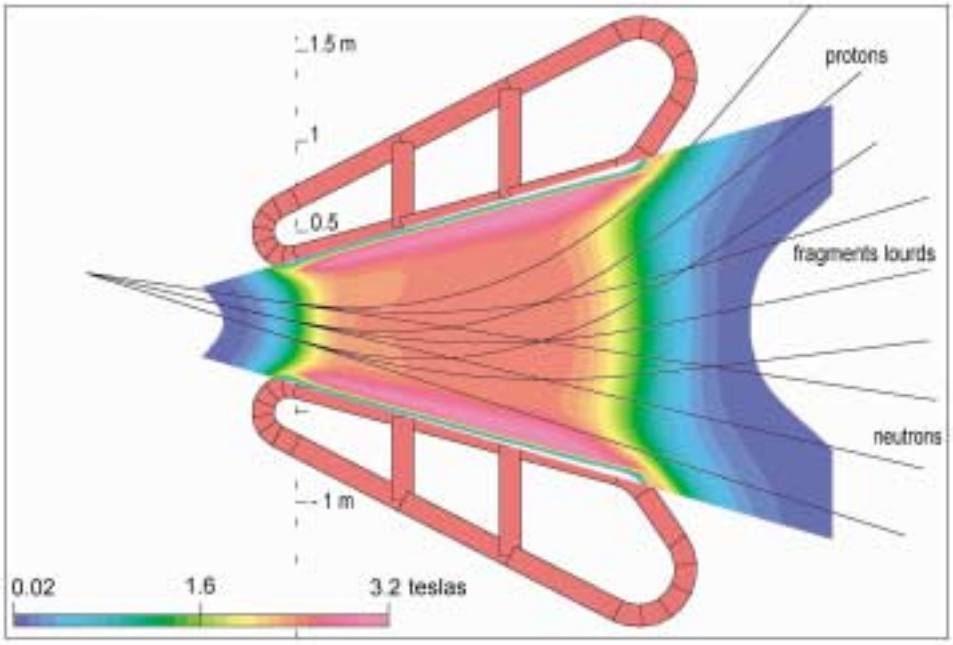


Comparaison de deux designs. Le bobinage graduel permet d'obtenir un plateau de champ le long de l'axe du faisceau par compensation de l'inclinaison des bobines, ce qui assure une bonne séparation des trajectoires.

utile et maintenir le champ sur le câble supraconducteur à une valeur inférieure à 7,5 T. Les bobines latérales sont également « graduées » et optimisées en vue d'annuler le champ de fuite à l'extérieur du dipôle et garantir un champ magnétique faible dans la zone cible. La position, la section et la forme trapézoïdale de toutes les bobines assurent un champ essentiellement dipolaire. Avec une densité de courant moyenne de 80 A/mm^2, ce design donne un aimant compact dont l'énergie stockée est minimale (22 MJ). La technologie du blindage actif présente l'attrait de la linéarité entre le courant d'alimentation des bobines et la carte de champ magnétique, combinant les avantages d'un aimant supraconducteur sans fer et d'un faible champ de fuite.

Le système de protection de l'aimant se compose d'une détection active des transitions résistives suivie d'une décharge de l'aimant dans une résistance externe. Les bobines sont précontraintes dans une boîte en alliage d'aluminium afin de contenir les efforts magnétiques qui atteignent des valeurs relativement élevées (entre 300 et 400 tonnes par mètre). Le refroidissement cryogénique indirect est assuré par conduction à travers le bobinage avec un écoulement d'hélium diphasique en thermosiphon. L'ensemble du cryostat, du séparateur de phases et des écrans thermiques prendra place dans une enceinte à vide cylindrique de 4 m de diamètre.

En juillet 2001, le rapport technique de conception a été validé par un comité international d'experts. En 2003, le dossier européen R3B-Glad « Construction de nouvelle infrastructure » a été préparé en vue du 6ème PCRD, et des études d'optimisation de la configuration finale se poursuivent. Le SACM pilote ce projet d'aimant avec les contributions du SPhN et du SIS, et participe à la collaboration R3B qui regroupe 22 instituts internationaux.



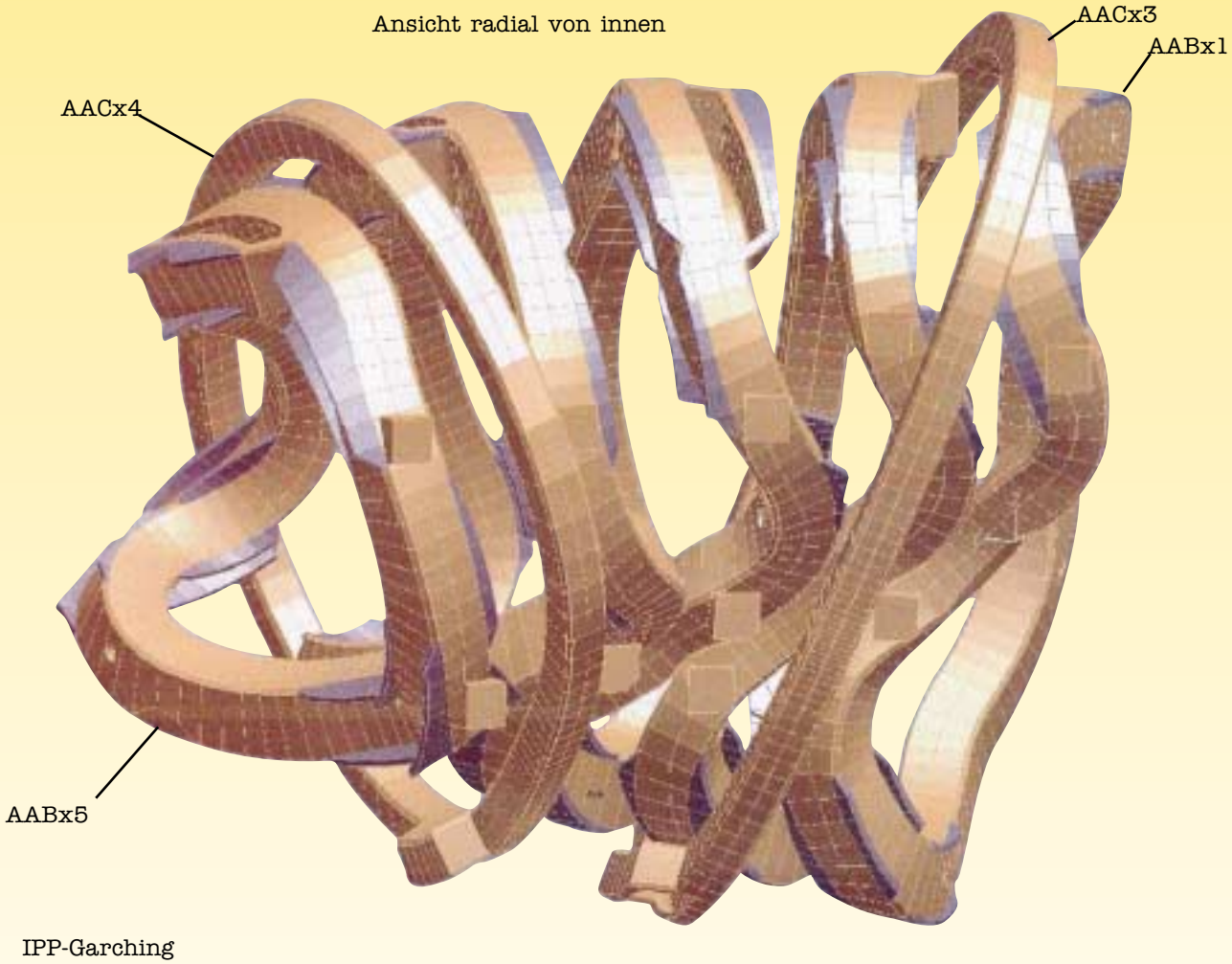
Carte de champ magnétique et indication des différentes trajectoires. En amont et en aval de la zone colorée, le champ magnétique est inférieur à 20 mT.
Les principaux paramètres définissant le dipôle sont les suivants :
(i) Une intégrale de champ élevée d'environ 5 Tm qui donne un angle de déviation de 18° pour un faisceau de rigidité magnétique égale à 15 Tm (ceci permet l'étude de noyaux exotiques tels que le ^{132}Sn à 1 GeV/nucléon ou le ^{8}He à 500 MeV/nucléon avec une bonne résolution).
(ii) Une grande ouverture verticale laissant traverser les particules à détecter (dont les neutrons) selon un cône de ± 80 mrad.
(iii) Une acceptance horizontale permettant un angle de déviation maximum de 40° pour les protons.

Électroaimants supraconducteurs pour les autres communautés scientifiques

Le SACM développe aussi ses compétences dans le cadre de projets initiés par d'autres communautés scientifiques.

Le SACM est en charge des essais de réception des bobines supraconductrices du stellarator Wendelstein 7-X, machine de recherche pour la fusion thermonucléaire par confinement magnétique, sous la direction de l'Institut de physique des plasmas de Garching, en Allemagne.

Dans le cadre du projet Neurospin de la Direction des sciences du vivant du CEA, le SACM a conduit une étude de faisabilité d'un système magnétique à grande ouverture et fort champ magnétique destiné à équiper ce futur centre de neuro-imagerie par résonance magnétique nucléaire.



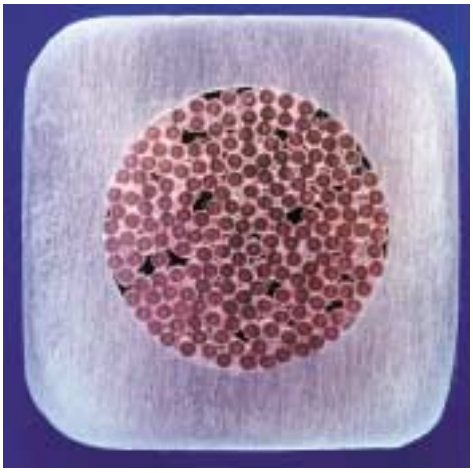
IPP-Garching

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 SACM a en charge les tests de réception des 70 aimants fabriqués en Allemagne, en Italie et en Angleterre, avant leur installation définitive sur le stellarator construit à Greifswald en Allemagne. Ces tests permettent d'étudier le comportement électrique, thermique et hydraulique de chaque aimant aux températures ambiantes et cryogéniques. Ils sont programmés sur une durée de 4 ans à partir de 2003.

Conception, réalisation et qualification d'une station d'essais

Du fait même de la configuration magnétique de la machine de fusion, les bobines ont une géométrie complexe : les bobines planes ont une masse de 3 tonnes et des dimensions approximatives de 3,5 m x 2,5 m tandis que les bobines non planes ont une masse de 6 tonnes et des dimensions de l'ordre de 2,5 m x 1,5 m. Le bobinage est constitué à partir d'un « câble en conduit », c'est-à-dire que les brins supraconducteurs (composites de niobium-titane et de cuivre) sont entourés d'une gaine étanche en aluminium. C'est dans cette gaine que circule l'hélium supercritique à une pression de 6 bars et une température comprise entre 4,5 K et 7,6 K. Ce type de conducteur a nécessité des boîtiers de raccordement électriques originaux incluant l'étanchéité avec la gaine. Pour obtenir le rythme de tests requis, une station d'essais comportant deux cryostats, pouvant recevoir chacun deux aimants, a été conçue et mise en place. En juillet 2000 le premier cryostat a été livré, les premiers essais cryogéniques de ce cryostat ont eu lieu en juin 2001.



Section du câble en conduit. Le câble est constitué de 243 brins de 0,57 mm de diamètre composés de niobium titane et de cuivre. Il est inséré dans une gaine en alliage d'aluminium de 16 mm de côté. De l'hélium supercritique circule entre les brins. Le courant de fonctionnement est d'environ 17 000 A sous 6,2 T.

À 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),
- contrôle de la perte de charge de chaque circuit des aimants.

À 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 partiellement son état supraconducteur,
- transition de chaque bobine par augmentation de la température.

Un banc de test électrique, validé en janvier 2003, et un banc de test hydraulique, validé en juin 2003, ont été étudiés et construits afin d'automatiser différentes séquences de tests et générer automatiquement des rapports pouvant s'intégrer dans le rapport général des tests.

Des tests d'isolement électrique de l'aimant devant être réalisés à température cryogénique, il a été nécessaire de développer pour les différentes parties de l'installation sous tension (amenées de courant, circuits hydrauliques, réservoirs des amenées de courant, etc.) des systèmes d'isolation par rapport à la masse ayant une tenue d'isolement de 10 kV sous vide et à 4,5 K. De plus, pour assurer les connections électriques entre les aimants et la station d'essais, nous avons développé des boîtes de jonctions. Ces boîtes de jonction sont tout à fait inédites puisqu'elles sont réutilisables, ne nécessitent pas de soudure, sont connectées directement au câble en conduit et peuvent supporter des pressions de 30 bars à 4,5 K.

Cryostats de la station d'essai en cours de montage à Saclay.

Le refroidissement des aimants est assuré par un réfrigérateur d'une puissance de 200 W à 4,2 K directement couplé à une boîte froide appelée « satellite » permettant de préparer les fluides cryogéniques pour l'un ou l'autre des cryostats. L'hélium de refroidissement des différents circuits des aimants est de l'hélium supercritique à 4,5 K sous 6 bars. La recherche de l'écart de température entre la température de fonctionnement et la température de transition donne la marge de fonctionnement de l'aimant ; elle s'effectue en augmentant la température d'entrée de l'hélium par incrément de 0,1 K depuis 4,5 K jusqu'à la température de transition. L'installation permet d'atteindre 7,6 K.

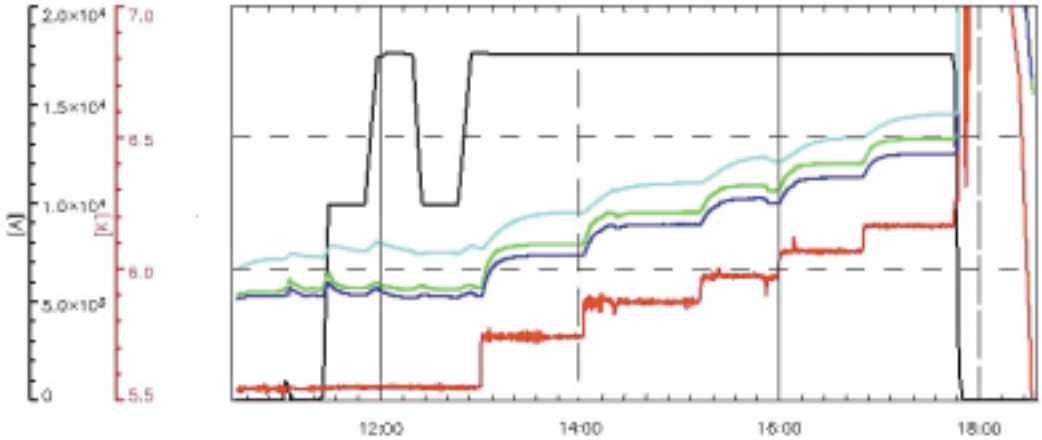
Tests des bobines

Entre septembre 2001 et mai 2003, l'étude d'une bobine prototype de démonstration a validé les différents tests effectués sur chaque poste. En particulier le test de la marge de fonctionnement, réalisé à plusieurs reprises, s'est montré reproductible et a permis de valider la stabilité de l'aimant après plusieurs transitions de l'état supraconducteur à l'état normal et aussi de contrôler tous les systèmes de l'installation : régulation, protection, acquisition et instrumentation.

La première bobine de série a été livrée en juin 2003. Les premiers tests à température ambiante ont été réalisés au cours du mois de juillet 2003. En septembre, les tests à température cryogénique ont été effectués, ainsi que la détermination de la marge de l'aimant suivie du réchauffage et des derniers tests à température ambiante. Les tests en courant à température cryogénique ont permis de démontrer une très bonne stabilité de l'aimant et une marge de fonctionnement supérieure à celle attendue. Fin octobre 2003, la bobine était prête pour son transport en Allemagne. Tous les tests réalisés sont conformes aux valeurs calculées et ce premier aimant de série peut être déclaré comme « valide ».

Arrivée de la première bobine de série à Saclay.

Au cours du dernier trimestre 2003, une équipe de 6 personnes a réalisé les tests à température ambiante et cryogéniques sur deux nouveaux aimants insérés ensemble dans le cryostat n° 2. Pour l'année 2004, il est envisagé de tester de 15 à 20 aimants en fonction du rythme d'arrivée des aimants.



Un « test de marge de fonctionnement » de la bobine de démonstration. La courbe noire montre la montée du courant à sa valeur nominale (17 600 A) avec un plateau intermédiaire à 10 000 A. Durant cette phase, la température d'entrée (en rouge) est régulée à sa valeur nominale de 5,5 K ; elle est ensuite augmentée de 0,1 K toutes les demi-heures jusqu'à la transition de la bobine (à 17 h 48).

Le projet Neurospin

La Direction des sciences du vivant du CEA a proposé le projet Neurospin qui consiste à concevoir et réaliser 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, qui sera construite dans l'enceinte du CEA Saclay, sera équipée de quatre systèmes RMN : deux systèmes produisant des champs magnétiques de 3 T et de 11,7 T pour des études cliniques sur l'homme, et deux systèmes destinés à des études précliniques sur le primate et le petit animal, respectivement de 11,7 T et de 17 T. Le SACM participe à l'élaboration du projet en tant qu'assistant à maître d'ouvrage. Il a conduit trois études destinées à vérifier la faisabilité et à cerner les difficultés des sous éléments particulièrement délicats que sont l'aimant de 11,7 T à grande ouverture, les bobines de gradient de champ magnétique et les antennes à haute fréquence.

Aimant supraconducteur de 11,7 teslas

Les hauts champs permettent d'augmenter les résolutions spatiale et temporelle de l'imagerie. Une pré-étude a montré qu'il est possible de réaliser un aimant de 11,7 T dans un diamètre utile de 900 mm - en niobium-titane refroidi par de l'hélium superfluide à 1,8 K - en respectant les contraintes d'homogénéité de champ (0,1 ppm dans une sphère de 10 cm) et de champ de fuite ($B < 5.10^{-4}$ T à 5 m du centre de l'aimant radialement et à 9,6 m axialement). Le système magnétique obtenu a une énergie stockée de 300 MJ et un encombrement de 4,1 m en longueur et de 3,2 m en diamètre. Cette étude a été menée par le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme en collaboration avec le Service d'ingénierie des systèmes.

Bobines de gradient de champ magnétique

Les hauts champs impliquent l'utilisation de systèmes de gradient performants, à grande amplitude de gradient de champ et à faible temps de commutation. Les bobines de gradient traditionnelles utilisées dans les aimants RMN sont soumises à des efforts cycliques importants induits par la commutation des gradients en présence d'un champ statique important; elles sont donc fragiles et émettent une nuisance sonore très importante. La répartition des efforts mécaniques sur un système traditionnel a été analysée et a permis de comprendre l'origine des bruits. Le professeur Guy Aubert - conseiller scientifique au Dapnia - a alors proposé une nouvelle structure d'aimants dont la particularité est une réduction importante des efforts qui devrait se traduire par une grande diminution du bruit. Cette proposition a fait l'objet d'un dépôt de brevet. Le test d'un prototype est prévu en 2004.

Antennes à haute fréquence

Ces antennes sont utilisées pour générer une onde radiofréquence (RF) dont le champ magnétique permet d'exciter les noyaux des atomes d'hydrogène au sein de l'échantillon placé dans la cavité, et de capter le signal radiofréquence très faible qui résulte de la relaxation du phénomène de RMN. Le SACM a modélisé les antennes traditionnellement utilisées et a montré qu'elles ne pouvaient pas fonctionner à 500 MHz, fréquence de résonance des protons correspondant au champ principal de 11,7 T. Une nouvelle structure d'antenne a été proposée par le Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme, et un modèle prototype a été réalisé par le Service d'électronique, des détecteurs et d'informatique. Ce prototype est actuellement en cours de test. Des mesures de *specific absorption rate* (SAR) seront également réalisées pour vérifier que la puissance générée par les impulsions RF dans les tissus d'une tête d'homme reste dans les limites acceptables.

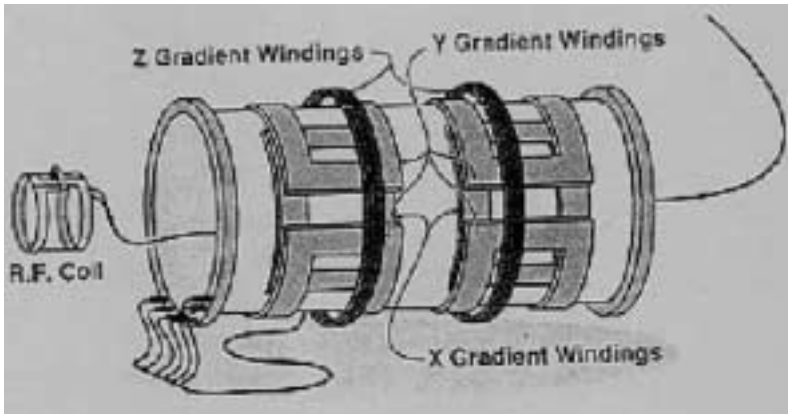
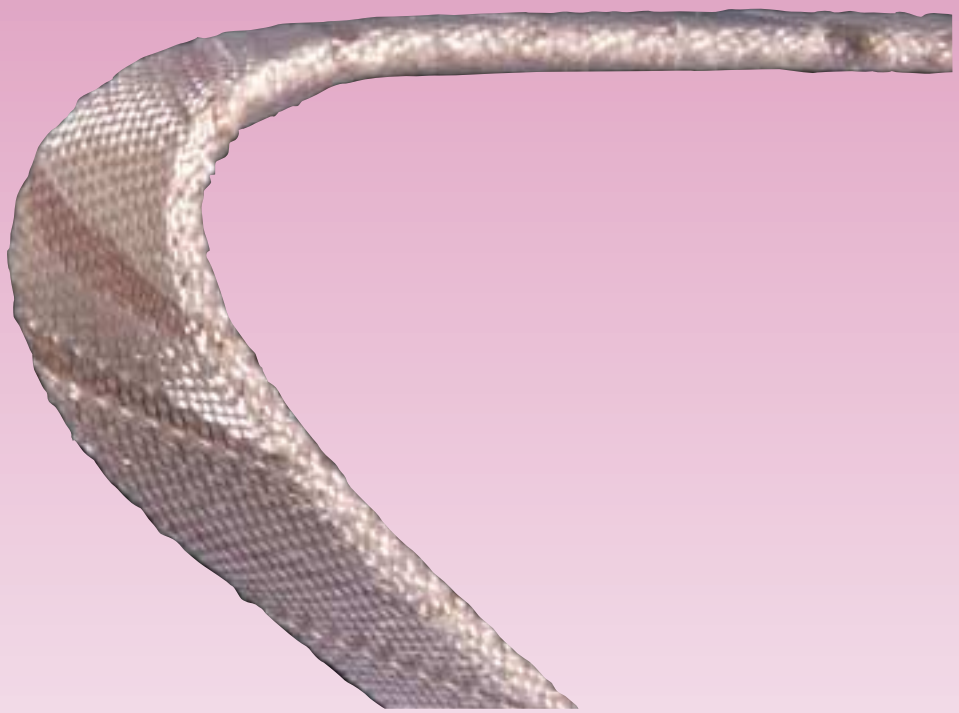


Schéma de l'agencement du solénoïde principal, des bobines de gradient et des antennes à haute fréquence d'un système RMN.

Développements pour les électroaimants du futur

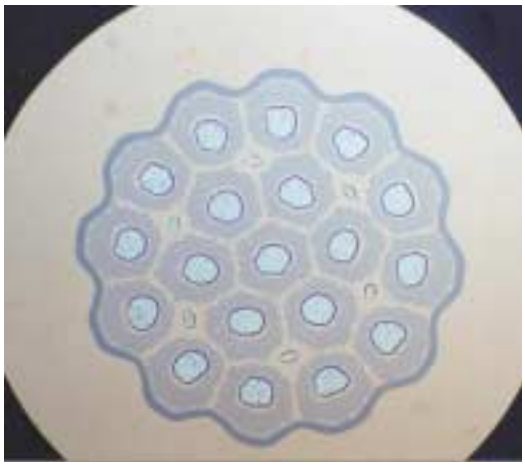
Les études et les réalisations des systèmes cryomagnétiques de haute technologie s'appuient sur des actions de R&D. Actuellement le programme prioritaire porte sur les développements nécessaires pour les aimants à haut champ magnétique (supérieur à 12 teslas). Un autre axe de R&D concerne l'hydrodynamique des écoulements d'hélium diphasique utilisé en particulier dans les systèmes de refroidissement par thermosiphon.



Développements pour aimants à fort champ magnétique

A l'heure actuelle, le seul supraconducteur apte à succéder à moyen terme au niobium titane (NbTi) dans des applications à grande échelle nécessitant des électroaimants de fortes densités de courant dans des champs magnétiques élevés - supérieurs à 12 teslas - est le composé intermétallique de niobium étain (Nb_3Sn). Le programme de recherche et développement, mené en collaboration par le CEA et Alstom, a pour objectif d'acquérir et de faire progresser la technologie du Nb_3Sn pour la maîtrise d'œuvre de nouveaux projets d'aimants supraconducteurs à très forts champs. Trois actions clés sont menées en parallèle : le développement de fils en Nb_3Sn à très hautes performances, la fabrication d'un quadripôle et le développement d'une isolation électrique en céramique.

Développement de fils en Nb_3Sn à forte densité de courant critique



Fil de Nb_3Sn développé par Alstom/MSA. La densité de courant critique dans le supraconducteur est de 750 A/mm² à 4,2 K et 12 T.

Le développement est articulé en deux phases. La première phase concernait le développement d'un fil de Nb_3Sn répondant aux spécifications des bobines modèles d'Iter et avait pour but de permettre à Alstom de combler son retard par rapport à ses concurrents, en particulier américains, tant en terme de performances que de rendement et de coûts de production. Le but a été atteint en 1999 avec un fil de 750 A/mm² à 4,2 K et 12 T. Pour rester compétitif au niveau mondial, Alstom développe actuellement, dans une seconde phase, un fil de 2000 A/mm² aux mêmes température et champ magnétique. Cette seconde phase constitue une étape intermédiaire vers l'objectif encore plus ambitieux d'une densité de courant critique de 1500 A/mm² à 4,2 K et 15 T (correspondant à 3000 A/mm² à 4,2 K et 12 T) fixé par l'activité de recherche européenne Care/NED.

Fabrication d'un quadripôle modèle

Le composé 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 d'être très fragile et d'avoir des paramètres critiques - comme la densité de courant - sensibles aux déformations. Comparé au NbTi, il faut donc complètement repenser la conception et la fabrication des bobines afin de limiter les risques de dégradation.

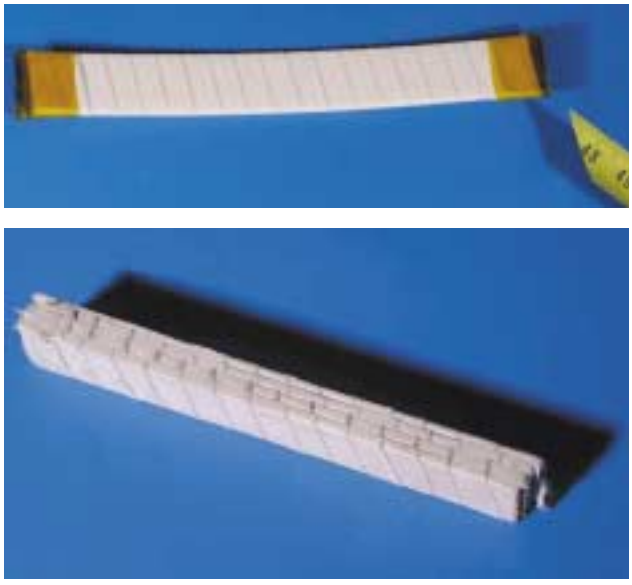
Outillage de bobinage pour la fabrication à Saclay du quadripôle modèle.

Depuis 1995, le SACM a entrepris un programme de conception, construction et test à froid d'un quadripôle basé sur la conception des aimants quadripolaires du *Large hadron collider* développé par le SACM pour le Cern. L'ouverture est de 56 mm et le gradient de champ nominal de 223 T/m pour un courant de 11870 A. Ce programme comporte la réalisation d'un modèle prototype intégrant le conducteur développé par Alstom dans la phase 1.

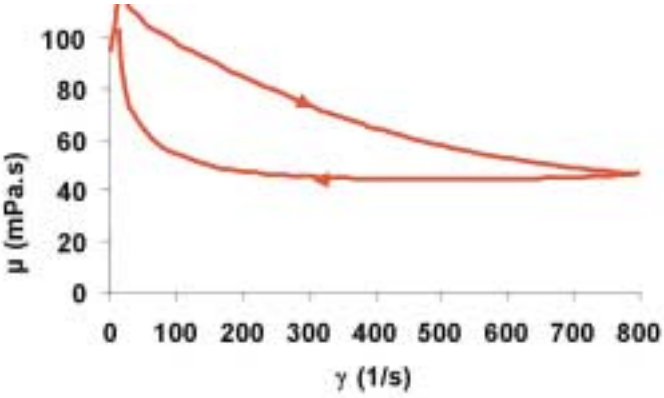
Les trois dernières années ont été consacrées à la finalisation du design et à l'approvisionnement des principaux composants et de l'outillage nécessaires pour le quadripôle modèle. Toutes les longueurs de câble seront livrées au début de l'année 2004. Le démarrage du bobinage du premier pôle est prévu en août 2004 et un test à froid de l'aimant à la fin de l'année 2005.

Développement d'une isolation en céramique

Le développement d'une « isolation céramique » a pour objectif l'étude et la mise en œuvre d'une isolation électrique pouvant supporter le traitement thermique à haute température (600 à 700°C) nécessaire à la formation du niobium-étain. Les conducteurs sont guipés avec un ruban de fibre de verre enduit de précurseurs qui réagissent pendant le cycle thermique à haute température, formant ainsi l'isolation et assurant la tenue mécanique de la bobine. Dans le même temps, le composé niobium-étain est constitué. On supprime ainsi deux étapes délicates de la fabrication : la manipulation de la bobine après réaction pour la sortir de son moule à un stade où elle est très fragile et l'étape d'imprégnation sous vide avec une résine de type époxy. Ce développement lèvera l'un des verrous de la technologie des bobinages compacts en Nb_3Sn en simplifiant leur gamme de fabrication et en la rendant plus industrielle.



Câble gainé du ruban imprégné avant traitement thermique (photo du haut).
Empilement de câbles isolés après traitement thermique à 660 °C (photo du bas).

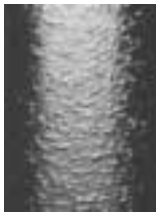


Evolution de la viscosité de la solution de précurseur, en fonction du taux de vitesse de déformation, montrant son comportement rhéologique. La solution doit assurer une bonne imprégnation du ruban et avoir une bonne plasticité.

Depuis janvier 2001, les développements se poursuivent dans le cadre d'une thèse cofinancée CEA-Région Languedoc Roussillon en collaboration avec le Laboratoire des céramiques et des composants avancés (CEA, Le Ripault) et l'Institut européen des membranes (CNRS, Montpellier). Cela s'est traduit par la mise au point d'une solution de précurseur adaptée, après la détermination des composants et une étude rhéologique, et, en parallèle, le développement d'un banc d'imprégnation pour les rubans de fibre de verre. Les premières étapes de mise en œuvre de l'isolation, à savoir l'enduction du ruban et le guipage d'un câble conducteur, ont été validées. Les premiers tests électriques ont montré que la présence de l'isolant lors de la réaction thermique ne modifiait pas les propriétés du cuivre entourant le brin conducteur. Des caractérisations électriques et mécaniques sont en cours.

Deux brevets sur le « procédé de fabrication d'une gaine électriquement isolante et mécaniquement structurante sur un conducteur électrique » ont été déposés par le CEA.

Thermohydraulique de l'hélium



Deux thèmes de recherche et développement sont menés dans le domaine de la thermohydraulique, tous deux orientés vers les études des systèmes de refroidissement des électroaimants supraconducteurs. Le premier thème, fortement lié au système cryogénique de l'aimant du *Compact muon solenoid* (CMS), concerne l'étude des écoulements à deux phases – gaz et liquide – dans une configuration en thermosiphon. Le second thème concerne les transferts de chaleur à travers les milieux poreux à l'hélium superfluide. Parallèlement à ces développements, des mesures de caractérisations thermiques de matériaux à très basses températures sont effectuées de façon à répondre aux besoins de projets internes, comme Atlas et CMS, ou d'entreprises ou de laboratoires extérieurs.

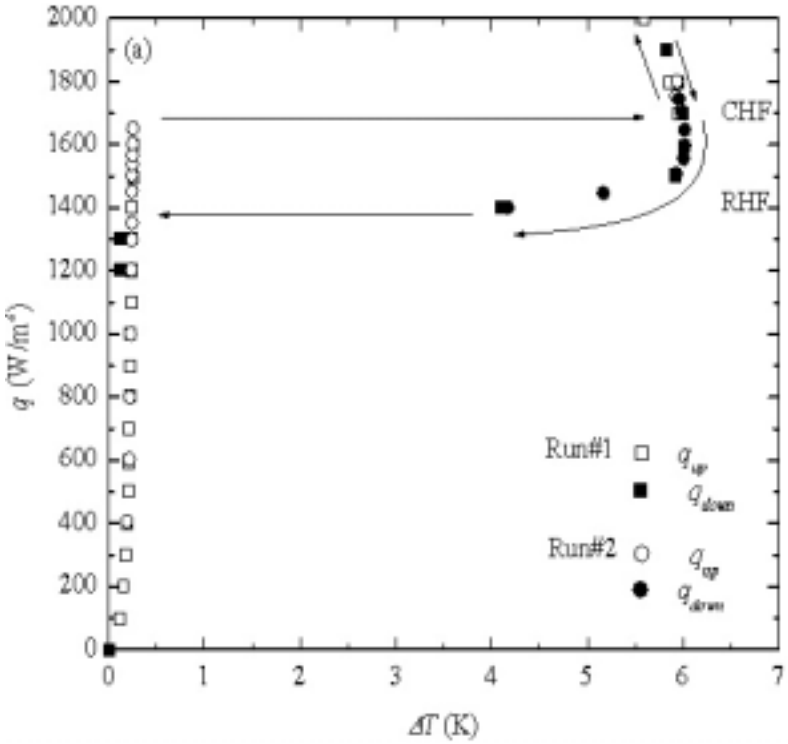
Écoulements diphasiques d'hélium dans une configuration en thermosiphon

Un système expérimental, composé principalement d'un séparateur de phases et d'une conduite hydraulique verticale de 1,2 m de long et de 14 mm de diamètre interne, insérée dans un circuit en U recréant ainsi une boucle de refroidissement, a été conçu et qualifié en 1999. De 2000 à 2003, l'étude des transferts de masse et de chaleur dans un écoulement diphasique d'hélium bouillant à 4,2 K a permis de déterminer les différents paramètres de la boucle de circulation tels que les débits massiques, les différences de température en paroi, les variations de pression le long de l'écoulement, les coefficients de transfert thermique et les flux critiques. Le débit et les variations de pression sont correctement prédits par le « modèle homogène » où le fluide diphasique est représenté par un fluide fictif monophasique aux propriétés moyennées. Néanmoins quelques interrogations subsistent concernant l'évolution du débit massique total en fonction du flux de chaleur déposé sur la hauteur de la conduite test. Cette évolution est semblable à celle d'autres mélanges diphasiques pour les faibles flux de chaleur, pour lesquels le gradient de pression gravitationnel domine sur le gradient de pression dû aux forces de frottement. Pour des flux de chaleur plus élevés, c'est-à-dire des proportions de gaz plus élevées, nos résultats ne présentent pas la décroissance de débit attendue.

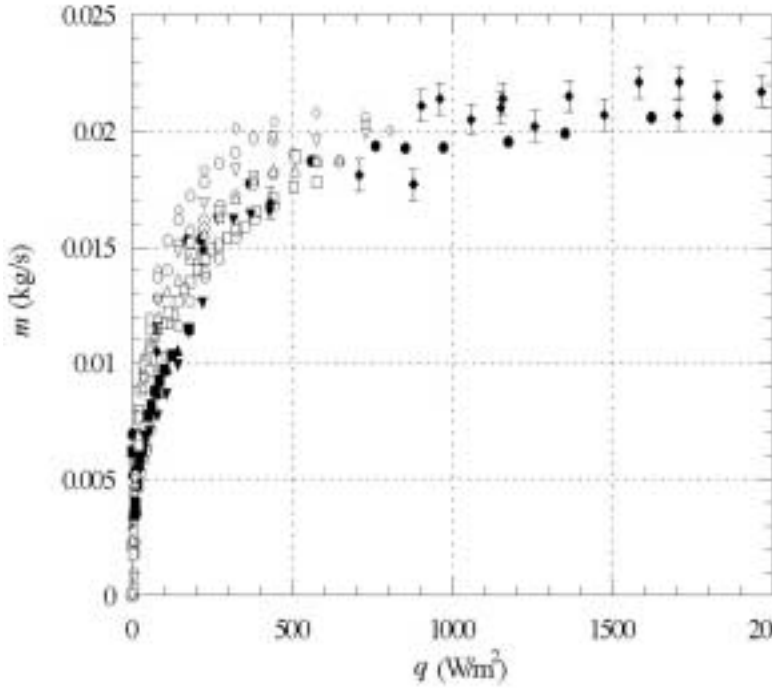
Boucle d'écoulement d'hélium sortie de son enceinte à vide. La conduite verticale de droite est munie de chauffeurs induisant un écoulement ascendant dans cette branche, et corrélativement, un écoulement descendant dans la branche de gauche du U. La conduite débouche, en partie supérieure, dans le séparateur de phases.

Transferts de chaleur en hélium superfluide à travers des milieux poreux

Pour les concepteurs d'aimants supraconducteurs, la compréhension des transferts de chaleur dans les bobinages est nécessaire aux études de stabilité thermique. Pour les aimants refroidis par de l'hélium superfluide, comme les dipôles et les quadripôles du LHC, la résistance thermique créée par l'isolation électrique des câbles forme la principale barrière 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 l'efficacité du refroidissement à l'hélium superfluide. Un système expérimental a été développé et permet l'étude des transferts de chaleur. Dans ces milieux, il faut considérer les transferts de chaleur à l'interface entre la matrice solide et l'hélium, la conduction dans la matrice solide et le transfert de chaleur dans l'hélium superfluide se trouvant dans les



Ecart de température ΔT entre la paroi chauffée et l'hélium, en fonction de la densité de flux de chaleur, à la hauteur de 0,3 m. La courbe est typique des écoulements bouillants où l'on trouve à flux croissant (q_{up}) une augmentation brutale du ΔT due à la disparition totale ou partielle du liquide mouillant la surface d'échange. Cette transition correspond au passage du régime d'ébullition nucléée au régime d'ébullition en film (CHF).



Débit massique total d'hélium dans le thermosiphon en fonction de la densité de flux de chaleur déposé le long de la branche verticale. Les différents symboles reportent des tests effectués à des périodes différentes, dans les mêmes conditions expérimentales.

pores de la matrice. Une première étape dans la compréhension des transferts de chaleur est menée sur des échantillons d'alumine. Elle se poursuivra par une seconde phase d'études des isolations céramiques.

Caractérisations thermiques de matériaux à basse température

La finalité de ces travaux est de déterminer les propriétés thermiques de matériaux entrant dans la composition des aimants supraconducteurs. Deux stations d'étude existent : l'une, la station « Kapitza », a été conçue pour l'étude des transferts de chaleur à l'interface entre un solide et l'hélium superfluide et l'autre, la station « Mecti », pour la mesure de la conductivité thermique de matériaux solides aux températures de l'hélium et de l'azote liquide. Les mesures réalisées à l'aide de la station « Kapitza » sont ciblées essentiellement sur des polymères, comme le kapton®, le mylar® et l'apical®, qui sont employés dans de nombreuses applications cryogéniques telles que l'isolation électrique des bobinages supraconducteurs. La station « Mecti » nous a permis de qualifier de nouvelles résines d'imprégnation et de nouveaux matériaux composites formés d'un mélange de résine et de microsphères de verre.

Les installations du SACM

Le SACM dispose d'installations techniques performantes nécessaires au développement de son expertise en cryomagnétisme et en radiofréquence :

- des stations d'essais, à 4,2 K et 1,8 K, pour les tests d'éléments supraconducteurs, d'électroaimants, de cavités accélératrices supraconductrices équipées de leurs coupleurs, avec les moyens d'acquisition et d'analyses nécessaires ; notamment, pour ne citer que trois exemples, la grande station W-7X, Cétacé, une station de test d'échantillons dans un champ magnétique pouvant atteindre 17 T, et Cryholab, un grand cryostat horizontal de laboratoire, propriété commune au Dapnia et à l'IN2P3 ;
- des laboratoires spécifiques pour les essais électriques, cryogéniques, mécaniques, radiofréquence, les caractérisations de matériaux, les traitements chimiques de surfaces ; un laboratoire de mesures magnétiques est en cours d'installation pour répondre aux besoins de plusieurs projets.

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

Station W-7X

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

2 cryostats : diamètre utile de 5 m ; hauteur utile de 4,1 m.
Réfrigérateur associé de 200 W à 4,2 K.
Alimentation électrique de 25 kA.
Acquisition des capteurs cryogéniques jusqu'à 500 Hz et des mesures de tension jusqu'à 20 kHz.

Schema - **S**tation **c**ryogénique **h**orizontale pour **e**ssais **m**agnétiques

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

Cryostat horizontal : diamètre utile de 0,6 m et longueur utile de 8 m.
Réfrigérateur de 25 W à 1,8 K (450 W à 4,2 K).
Alimentation stabilisée à 10^{-4} de 20 kA sous 5 V.
160 voies de mesure à 20 kHz.

Station verticale

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

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

Stations de tests sous champ magnétique

Cétacé – **C**ryostat d'**e**ssais à **t**empérature **a**justable et **c**hamp **é**levé

Mesures de courant critique de supraconducteurs.

Courant maximal dans l'échantillon : 2000 A.
Champ magnétique maximal : 17 T.
Diamètre utile de l'aimant : 64 mm.
Diamètre utile du cryostat de l'échantillon : 49 mm.
Température de l'échantillon : 1,8 K à 200 K.

Christiane

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

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

Séjos – **S**tation d'**e**ssais de **j**onctions **s**upraconductrices

Tests de connexions électriques à 4,2 K.

Courant maximal dans l'échantillon : 10 000 A.
Champ magnétique maximal : 4,7 T.
Diamètre utile de l'aimant : 90 mm.
Diamètre utile du cryostat de l'échantillon : 76 mm.
Un transformateur supraconducteur permettra de tester des conducteurs jusqu'à des intensités de courant de 70 000 A.

Aimant RMN 530

Tests sous champ magnétique d'équipements tels que capteurs, détecteurs, etc. à température ambiante.

Champ magnétique maximal : 2 T.
Diamètre utile de l'aimant : 510 mm.
Axe horizontal.

Aimant Optimist

Tests sous champs magnétiques d'équipements tels que capteurs, détecteurs, etc, à température cryogénique.

Champ magnétique maximal : 8,8 T.
Diamètre utile de l'aimant : 150 mm.
Axe horizontal.

Stations de tests de cavités supraconductrices et de ses équipements

Bancs de tests de coupleurs de puissance

Deux stations de puissance radiofréquence : un banc de 1300 MHz avec un fonctionnement pulsé de 1,5 MW crête, impulsion de 1 ms à la fréquence de 10 Hz (15 kW moyen) ; un banc de 704 MHz - 80 kW continu.
Les composants RF peuvent être testés en onde progressive et en onde stationnaire.

Cryholab – Cryostat **ho**rizontal de **lab**oratoire (propriété Dapnia - IN2P3)

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

Coupleur de puissance radiofréquence : actuel 700 W ;
en cours de réalisation : 80 kW en continu ; jusqu'à 1 MW en pulsé.
Groupe de pompage associé à un réfrigérateur Hélial 4012 :
80 W à 1,8 K et 13 mbar.
Dimensions internes utiles : 1,5 m de long et 70 cm de diamètre.

Cryostats verticaux CV

Mesure du champ accélérateur et du coefficient de surtension de cavités radiofréquences supraconductrices.

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

CV1	CV2	CV3
Diamètre utile : 0,7 m, hauteur : 2,92 m.	Diamètre utile : 0,45 m, hauteur : 1,7 m.	Diamètre utile : 0,35 m, hauteur : 1,5 m.
Hauteur He : 1,9 m à 4,2 K et 1,2 m à 1,7 K.	Hauteur He : 1 m à 4,2 K et 0,6 m à 1,7 K.	Hauteur He : 1 m à 4,2 K et 0,6 m à 1,7 K.
Consommation : 1500 L / test.	Consommation : 450 L / test.	Consommation : 400 L / test.

Stations de caractérisation

Mesures du RRR *(residual resistivity ratio)*

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

Mecti - **Me**sure de **c**onductivité **t**hermique des **i**solants

Tête froide permettant des mesures sur des échantillons d'une trentaine de centimètres sur une gamme de température de 1,8 K à 60 K en hélium et de 80 K à 150 K en azote.

Thermosiphon

Caractérisation des écoulements diphasiques par des mesures de débit massique, de titre, de pertes de pression et de température en paroi le long d'une section de test verticale de 1,2 m insérée dans un circuit en U recréant une boucle de refroidissement fonctionnant en thermosiphon.

Débit massique d'hélium liquide : de 0 à 22 g/s.
Titre massique de vapeur : de 0 à 0,25.
Densité de flux de la chaleur en paroi : de 0 à 2,2 kW/m^2.

Réfrigérateurs et liquéfacteurs d'hélium

Liquéfacteur/réfrigérateur Hélial 4012 associé à Cryholab

En liquéfaction : environ 200 L/h à 4,2 K.
Puissance de réfrigération : environ 80 W à 1,8 K avec groupe de pompage de 4 g/s à 13 mbar.

Liquéfacteur/réfrigérateur Cello associé à la station d'essais Schema

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

Liquéfacteur/réfrigérateur Hélial 4003 associé à la station d'essais W7X

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

Liquéfacteur Hélial 4008 de la station de liquéfaction

En liquéfaction : environ 70 L/h.
Puissance de réfrigération : environ 200 W à 4,2 K.
Livraison d'hélium liquide en 2003 : 176 000 L.

Laboratoires et ateliers

Laboratoire d'essais mécaniques

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

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

Laboratoire de chimie et salle blanche

Laboratoire de chimie

Traitements de surface des cavités accélératrices supraconductrices.

8 sorbonnes pour le traitement des échantillons et des cavités, dont une installation de « chimie intégrée » (installation fermée qui permet de traiter uniquement la surface interne par des acides filtrés, réduisant ainsi les risques de contamination).
3 stations de dégraissage par ultra son (10 L, 60 L, 120 L)
Installation de production d'eau ultra pure de 3 m^3.
Moyens de contrôle (microscope, brillancemètre, balances de précisions).

Salle blanche de classe 100 (surface de 35 m^2)

Assemblage des cavités après un rinçage à haute pression.

Flux laminaire de classe 100.
Boucle d'eau ultra pure et ultra filtrée.

Laboratoire d'ultravide

Le laboratoire d'ultravide a en charge le calcul du vide des accélérateurs, la recherche sur la désorption des matériaux, le développement de la technique d'ultravide et de la mécanique du vide.

Four à ultravide 1200 °C, 10^{-6} Pa.

Atelier des techniques du vide

Le laboratoire dispose des matériels de pompage et de détection de fuite pour la mise en œuvre des vides d'isolation des enceintes cryogéniques et le contrôle d'étanchéité de ces enceintes ou de tuyauteries.

Atelier de bobinage

L'atelier est équipé de 2 machines à bobiner : l'une permet de réaliser des aimants solénoïdaux pouvant atteindre 2 m de diamètre extérieur, l'autre est plutôt dédiée aux bobines de petites dimensions ou au guipage de courtes longueurs de conducteurs pour des essais de caractérisation.

Laboratoire d'imprégnation

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

Atelier de mécanique

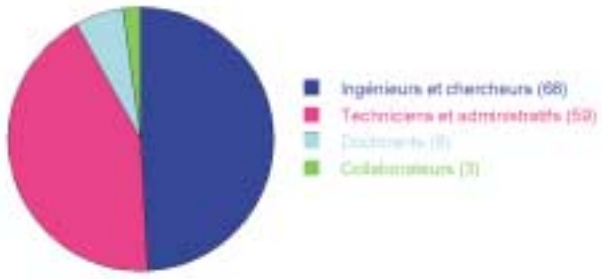
L'atelier de mécanique est plus un atelier de prototypage qu'un atelier de production. Il permet de répondre aux besoins urgents des expériences dans le cas de modifications ou de reprises imprévues. Il est équipé de 5 tours, 5 fraiseuses, 1 aléseuse, 1 rectifieuse plane et une dizaine de machines diverses (perceuses, scies,…).

Informations générales

Ressources humaines

A la fin de l'année 2003, le SACM regroupe 138 personnes, toutes catégories confondues.

Répartition du personnel du SACM par catégorie (fin 2003)



Budget

Répartition des dépenses du SACM en 2003 (en k€)

Production scientifique

Le bilan des activités scientifiques de 2001 à 2003 s'établit à 162 publications, 5 thèses soutenues, 2 brevets et 2 prix. La liste des publications et des thèses est consultable sur le site Internet du Dapnia :
http://www-dapnia.cea.fr/Doc/Publications/index.php
8 agents du SACM donnent des cours dans des universités ou des grandes écoles.

Conseil scientifique

Un conseil scientifique et technique du service, composé de 16 membres dont 5 experts extérieurs au service, se réunit environ deux fois par an. Il aide le chef du SACM à élaborer la politique de R&D propre du service ; il donne un avis sur les nouvelles propositions et dresse un bilan régulier des activités en cours. Les comptes rendus des derniers conseils se trouvent sur le site :
http://w10-dapnia.saclay.cea.fr/Sacm/compterendus/index.php

Sécurité

Les règles générales de sécurité sont explicitées dans le manuel *Instructions générales de sécurité du centre d'études de Saclay* que l'on trouve sur le site :
http://www-saclay.cea.fr:8000/ise/textes_reglementaires.htm
Les consignes particulières de l'installation 82 du SACM sont résumées dans un mémorandum consultable sur le site :
http://w10-dapnia.saclay.cea.fr/Sacm/securite/index1.php

Personnel du SACM au 31 décembre 2003

ANTOINE	Claire
ARNAUD	Michel
ASPART	Alain
AUCLAIR	Jean-Pierre
BALLESTER	Francisco
BAUDOUY	Bertrand
BEAUVAIS	Pierre-Yves
BEN ISMAIL	Ahmed
BENKHEIRA	Lahcène
BENMEZIANE	Karim
BERNAUDIN	Pierre-Emmanuel
BERRIAUD	Christophe
BERRY	Stéphane
BERTON	Jean-Bernard
BIAGINI	André
BISSIRIEX	Jacques
BOSLAND	Pierre
BOUDIGOU	Yves
BOURDELLE	Gilles
BOUZIAT	Denis
BRASSEUR	Alain
BRAUD	Didier
BREDY	Philippe
CARRE	Stéphane
CAZANOU	Marc
CAZAUX	Sandrine
CHARRIER	Jean-Pierre
CHARRUAU	Georges
CHEL	Stéphane
CHESNY	Philippe
COADOU	Bernard
CONGRETEL	Gerard
COTTEVERTE	Eliane
CURTONI	Aline
DARENNES	Jean-Jacques
DEBU	Pascal
DE-MENEZES	Denis
DECHAMBRE	Thierry
DELFERRIERE	Olivier
DELHEUSY	Mélissa
DENIS	Jean-François
DEREGEL	Jean
DESAILLY	Catherine
DESMONS	Michel
DEVANZ	Guillaume
DEVRED	Arnaud
DOUARIN	Jean-Dominique
DUPERRIER	Romuald
DURANTE	Maria
FAZILLEAU	Philippe
FELICE	Hélène
FERDINAND	Robin
FRANCE	Alain
GAGNE	Michel
GAIFFIER	Jacques
GALLOYER	Jean-Maurice
GASSER	Yves
GASTINEAU	Bernard
GAUTHIER	Yannick
GENIN	Christian
GENINI	Laurent
GHELLER	Jean-Marc
GOBIN	Raphaël-Jean
GODON	Pascal
GOUET	Jacky
HAMDI	Abdallah
HANUS	Xavier
HARRAULT	Francis
HERVIEU	Bertrand
HUMEAU	Michel
JABLONKA	Marcel
JACQUES	Eric
JUSTER	François-Paul
KABBOUCH	Hafid
KIRCHER	François
KULBICKI	Lucien
LANNOU	Hervé
LAZARD	Gerard
LE DORTZ	Patrick
LE-GUEN	Marcel
LEBOEUF	René
LEROY	Pierre-Alain
LEVESY	Bruno
LOTTIN	Jean-Pierre
LOUCANO	Delfin
LUONG	Michel
MAGNE	Christian
MAILLERET	Charles
MANZATO	Michael
MAYRI	Christophe
MEOT	François
MEURIS	Chantal
MICHEL	Frédéric
MONNEREAU	Gilles
MOSNIER	Alban
MOUGEOT	Denis
MOUYON	David
NAPOLY	Olivier
NARDIN	Philippe
NICOLLEAU	Catherine
NOVO	Jorge
PAGET	Florian
PAINCHAULT	Michel
PALANQUE	Serge
PAPARELLA	Rita
PAYET	Jacques
PAYN	Alain
PEROLAT	Alain
PERRIN	Jean-Luc
PES	Chhon
PHILIP	Danielle
PIQUET	Olivier
POITEVIN	Michel
PORCHER	Alain
POUPEAU	Jean-Pierre
PRZYBYLSKI	Alain
PUECH	Anne-Marie
PUIGSEGUR	Alexandre
QUETTIER	Lionel
REGNAUD	Sylvie
REY	Jean-Michel
RIFFLET	Jean-Michel
RONDEAUX	Françoise
ROUDIER	Dominique
SAHUQUET	Patrick
SCHILD	Thierry
SEGRETI	Michel
SIMON	Fabrice
SUEUR	Michel
THOMAS	Denis
TOUET	Joël
TRILLAUD	Frédéric
URIOT	Didier
VACHER	Thierry
VEDRINE	Pierre
VERON	Geneviève
VIEILLARD	Laurence
VISENTIN	Bernard
ZAITZEV	Iouri

Directeur de la publication
Pascal DEBU

Mise en page et impression
Graphotec

Nous tenons à remercier tous les agents du SACM qui ont contribué à ce rapport.

Dapnia/SACM
CEA/Saclay
F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Téléphone : +33 (0)1 69 08 69 49
Télécopie : +33 (0)1 69 08 49 50
E-mail : sacm@dapnia.cea.fr