

Pôle accélérateurs et sources d'ions

Le pôle accélérateurs et sources d'ions travaille à la conception et à la construction d'accélérateurs, de sources d'ions pour la physique, mais aussi pour les applications industrielles. L'implication du pôle dans différents programmes, régionaux, nationaux et internationaux, permet d'apporter des réponses aux besoins techniques d'objectifs scientifiques extrêmement variés : physique nucléaire (neutronique, physique des réacteurs, production de faisceaux radioactifs accélérés), physique des particules (faisceaux de neutrinos), physique des accélérateurs (dynamique faisceau, spectrométrie de masse), applications des faisceaux d'ions (traitement des surfaces, formation de couches minces par pulvérisation). Les activités de valorisation du pôle sont présentées dans le chapitre Valorisation et transferts de technologie de ce rapport.

Pour cette période 2010-2011, des étapes très importantes ont été franchies pour les projets phares :

Après son installation, le GÉnérateur de NEutrons Pulsé Intense, GENEPI-3C, a été mis en service auprès du réacteur VENUS-F du SCK•CEN à Mol en Belgique. Ainsi le premier couplage entre l'accélérateur et le réacteur a pu être effectué avec succès en octobre 2011.

Pour SPIRAL2, le transport de faisceau de la Ligne Basse Energie a été validé ainsi que l'extraction des faisceaux de la source PHOENIX-V2 à 60 kV. Pour la conception de l'accélérateur de la phase « ions radioactifs », le LPSC a débuté, sous la responsabilité d'un chercheur du pôle, la conception de la ligne d'analyse en aval du booster de charge. Nous allons évaluer prochainement si le LPSC s'engage dans la construction de cette ligne verticale. Cette nouvelle activité, qui profiterait directement de la construction de la ligne verticale de GUINEVERE, serait un projet commun entre les équipes accélérateurs et sources d'ions en collaboration avec les services techniques du laboratoire.

Pour les sources, un prototype de source utilisant les techniques d'aimants à champs intenses, et développé en collaboration avec le Laboratoire National des Champs magnétiques Intenses de Grenoble, a été construit. Son champ magnétique a été mesuré pour une intensité de 15000 A, validant ainsi les choix techniques effectués et permettant de commencer les expériences de source d'ions à 28 GHz.

Le pôle poursuit une politique active de participation à des projets internationaux ainsi qu'au lancement de nouveaux projets, par exemple, nous avons intégré les activités de R&D sur le booster de charge dans le cadre européen de NuPNet (Nuclear Physics Network) au sein du projet « Enhanced Multi-Ionization of short-Lived Isotopes at EURISOL », financé sur 3 ans à partir de 2012. Le pôle a proposé et porté un projet d'Equipex « COLOSSECRIS » regroupant le LPSC, le LNCMI, le GANIL et l'IPNL afin de créer une plateforme de développement de champs magnétiques intenses nécessaires aux sources d'ions. Pour les développements sur les technologies des accélérateurs, il a proposé conjointement avec les laboratoires LAPP, SBT/INAC (CEA) et SYMME de l'université de Savoie, le projet Equipex HoMe.

Le pôle est évalué par l'Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur au même titre que les activités scientifiques du laboratoire et est encouragé à poursuivre son développement, il été noté A+ par cette agence en 2010.

Projet SPIRAL2

J. Angot, M. Baylac, T. Cabanel, Y. Gómez Martínez, J. Jacob, T. Lamy, M. Marie-Jeanne, R. Micoud, J. Morfin, P. Sole, P. Sortais, T. Thuillier, J.-L. Vieux-Rochaz

D. Bondoux, C. Fourel, G. Freche, J. Giraud, D. Marchand, S. Roudier, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques

R. Faure, O. Zimmerman, Service Détecteurs et Instrumentation

P. Meyrand, Service Informatique

C. Peaucelle, Institut de Physique Nucléaire de Lyon

The accelerators and ion sources pole has an important contribution to the SPIRAL2 accelerator. We are in charge of the delivery of the $Q/A=1/3$ heavy ion source with its low energy beam line, of the 30 RF couplers to feed the LINAC cavities and of the ECR Charge breeder necessary to multi ionise the radioactive ion beams produced after the target. We are also in charge of the design of the vertical $n+$ beam line located just after the charge breeder.

Sources d'ions lourds ($Q/A=1/3$) et ligne basse énergie

Ligne basse énergie

La Ligne Basse Énergie (LBE1) ions lourds de SPIRAL2, conçue par les partenaires du projet (IPNO, GANIL, CEA/IRFU) a été assemblée au LPSC en 2009. Sur la période 2010-2011, les partenaires sont venus tester leur matériel et corriger les petits défauts inhérents à toute nouvelle conception. Ainsi l'équipe de dynamique faisceau a pu valider le pouvoir de résolution de l'aimant d'analyse $M/dM \sim 100$ et vérifier que l'hexapole associé à ce même aimant permettait de bien corriger les aberrations du 2^e ordre qu'il génère sur les émittances du faisceau. Les premiers tests de productions d'ions métalliques ont débuté en collaboration avec l'équipe du GANIL. Un faisceau préliminaire de $25 \mu\text{A}$ de Ca^{13+} a été produit. Une sur-évaporation de Calcium a été observée pendant cet essai et une nouvelle campagne va se dérouler fin 2011. La source PHOENIX V2 a été caractérisée en Argon : elle produit $135 \mu\text{A}$ d' Ar^{12+} , ce qui, compte tenu de son faible volume de plasma (0,6 litre) est un bon résultat, bien que très loin des fortes ambitions du cahier des charges (1 mA). Un nouveau système d'extraction a été conçu et installé sur la source afin d'assurer un fonctionnement fiable à la tension de 60 kV, tension imposée par le RFQ (cavité radio fréquence) et assez pénalisante pour une technologie de source d'ions multichargés. Le système, maintenant validé, est composé d'une électrode plasma à 60 kV, une électrode intermédiaire à mi-tension et d'une électrode masse. Le jalon de 1^{er} faisceau extrait à 60 kV a été satisfait le 30 Août 2011. Le glissement de 6 mois du planning de SPIRAL2 sera utilisé pour réaliser les tests de production des faisceaux d'ions lourds prévus pour la première année de fonctionnement. La LBE1 sera démontée et envoyée vers le GANIL mi 2012.

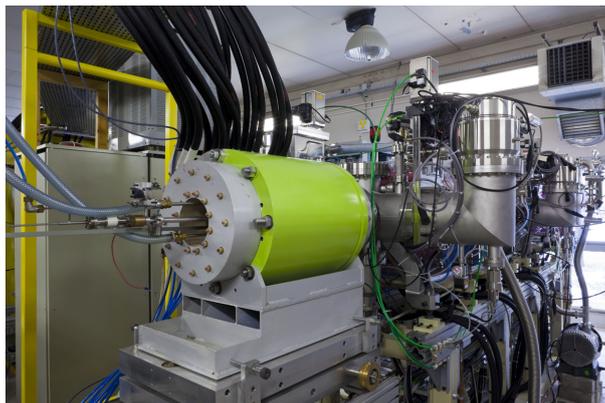


Fig. 1: Source d'ions PHOENIX V2 montée sur la Ligne Basse Énergie de SPIRAL2 (© photo Luca Casonato).

Source d'ions $Q/A=1/3$

Dans l'attente d'un financement pour une source d'ions définitive, Il est prévu que le LPSC prête au GANIL une source d'ions lourds pour assurer le démarrage de l'accélérateur. Par défaut, il s'agit de la source PHOENIX V2 qui répond partiellement au cahier des charges. Une étude de R&D se poursuit sur la source d'ions A-PHOENIX pour tenter d'améliorer ses performances pour le moment très médiocres. Ainsi, une nouveau système d'injection HF a été conçu et réalisé en 2010, permettant de modifier la longueur de la cavité plasma de 8 cm et d'injecter les micro-ondes plus près de l'axe de la source. Ce montage a clairement permis d'améliorer le couplage HF en augmentant la charge moyenne du plasma. La production d' O^{6+} a progressé de 20% pour donner $470 \mu\text{A}$ à la fréquence de chauffage de 18 GHz. Ce résultat est néanmoins très décevant (au moins 1,5 mA devrait être produit dans ce type de source).

Une analyse a été menée et laisse penser que le défaut est produit par la présence d'une variation de l'intensité du confinement magnétique radial le long de l'axe de la source. Cette variation, non existante dans les autres sources ECR, a été imposée au départ de la conception par le faible diamètre libre interne des solénoïdes supraconducteurs de 120 mm, (au lieu de 180 mm idéalement) eux même contraints par le manque de budget disponible au départ. Récemment, l'installation d'une chambre à plasma spéciale permettant d'augmenter le champ magnétique radial de 15% dans la zone d'extraction a permis d'augmenter la production d' O^{6+} de 20% (560 μA). Les tests à 18 GHz ont été arrêtés et la R&D d'A-PHOENIX s'achèvera en 2012 sur les tests à 28 GHz, fréquence où l'on peut espérer une nette amélioration des résultats.

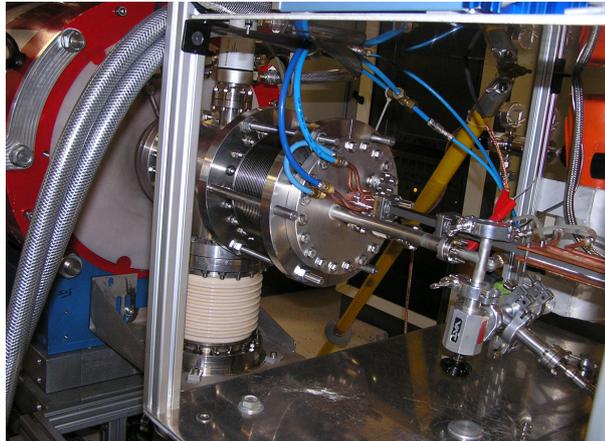


Fig. 2: Vue du nouveau système d'injection de la source d'ions A-PHOENIX.

Pour l'avenir du projet SPIRAL2, une étude préliminaire a démarré en mai 2011, en collaboration avec le GANIL et l'IPNL, sur la réalisation d'une nouvelle source d'ions totalement supraconductrice, dont le grand volume du plasma et le fort champ de confinement magnétique permettront de satisfaire le cahier des charges de SPIRAL2. Le financement de cette source a été demandé dans le cadre de l'Equipex COLOSSECRIS porté par le LPSC.

Les coupleurs RF de puissance

Nous sommes en charge des coupleurs radiofréquence (RF) de l'accélérateur linéaire supraconducteur qui ont pour but principal de transférer la puissance des amplificateurs RF (88,05 MHz, puissance nominale de 12 kW en continu) aux cavités accélératrices du linac.



Fig. 3: Coupleurs RF de puissance pour le projet SPIRAL2.

Le LPSC a réalisé la conception radiofréquence et technologique des coupleurs ainsi que la conception et le test d'un système de compensation des efforts barométrique et thermique. Le LPSC a participé aux tests des coupleurs dans les cryomodules.

Le LPSC est en charge de la réception, de la préparation et du test des 30 coupleurs pour l'accélérateur.

- L'étape de réception des coupleurs s'est achevée en 2011 avec l'acceptation de tous les coupleurs. Dans cette étape, le LPSC a réalisé, pour chaque coupleur, un contrôle dimensionnel, un contrôle d'étanchéité et une mesure de la réflexion et de la transmission de la puissance pour vérifier la conformité de ceux-ci.
- La préparation des coupleurs : le LPSC réalise pour chaque coupleur et toutes ses pièces annexes un dégraissage au bac à ultra-sons, un rinçage à l'eau ultra-pure 14 M Ω , un soufflage à l'azote filtré, un étuvage sous vide à 200° C, le montage sur banc de test et un étuvage in situ. Toutes ces actions sont réalisées dans une salle propre pour assurer le

niveau de propreté requis pour les cavités accélératrices supraconductrices ($E_{acc} = 6,5$ MV/m). En 2010-2011, nous avons amélioré la qualité de la salle propre en passant d'une classe ISO7 à ISO6. Nous avons amélioré la propreté des coupleurs avec l'introduction de filtres à particules sur toutes les injections de gaz et la limitation à 1 l/min du débit de remontée à la pression atmosphérique. Des mesures de taux de poussières ont été aussi intégrées pour vérifier que le coupleur satisfait les nouveaux critères d'empoussièrement demandés par le projet.

- Le test des coupleurs: chaque coupleur est soumis à la gamme complète des puissances qu'il doit transmettre à SPIRAL2 lors d'un test réalisé de façon automatique. Depuis 2011, cette procédure s'effectue également de façon continue (24h/24h), même à haute puissance.
- L'expédition des coupleurs: elle est réalisée dans un emballage spécifiquement conçu pour protéger le coupleur des chocs et garantir sa propreté, avec un transporteur dédié.

En 2010-2011, un effort particulier a été fait concernant la fiabilisation et l'optimisation du temps de la chaîne de traitement du coupleur. Notre but est de réduire de 20 à 14 jours ouvrés le temps du traitement complet par coupleur.

Booster de charge

L'activité de R&D expérimentale pour le booster de charge s'est effectuée en tant que R&D propre au service des sources d'ions (dite «générique»), ainsi que dans le cadre d'un accord signé entre l'INFN et le GANIL au sein du Laboratoire Européen Associé COLLIGA.

Améliorations techniques du banc $1+/n+$

Les campagnes de mesures ont été l'occasion de fiabiliser le banc expérimental après 10 ans de fonctionnement, on peut citer le réalignement de tous les éléments optiques et de diagnostics de la ligne de faisceau, l'amélioration du vide (obtenu par la séparation en zones de pompage distinctes et par l'utilisation de pompes primaires sèches), la stabilisation du champ magnétique du spectromètre $n+$. La source $1+$ COMIC, installée fin 2009, a été fiabilisée et délivre maintenant des faisceaux d'une grande stabilité.

Augmentation des efficacités

Dans un booster de charge ECR, le faisceau $1+$ est amené à haute énergie jusqu'au plasma de celui-ci au travers d'un tube porté au potentiel terrestre (tube ralentisseur). À l'extrémité de ce tube, qui se trouve à l'intérieur de la source, les ions incidents sont ralentis sur une très courte distance puis sont capturés par le plasma. Ce tube limite l'acceptance du système et représente une difficulté majeure pour les opérations de maintenance, surtout dans le futur contexte de l'injection de faisceaux radioactifs. Des calculs de trajectoires ioniques effectués avec le code SIMION, et incluant le champ magnétique tridimensionnel de la source (calculé avec RADIA), ont montré que des solutions de réglages optiques existaient sans tube ralentisseur pour amener le faisceau $1+$ à l'intérieur du booster, mais en ajoutant une électrode de grand diamètre à l'entrée de celui-ci. Cette nouvelle configuration a été réalisée puis testée en injectant un faisceau d' Ar^{1+} et un faisceau de Rb^{1+} . Il a été observé lors des premières expériences, une plus grande stabilité du plasma, la diminution de la puissance micro-onde (14 GHz) nécessaire pour le bon fonctionnement du booster ainsi que l'augmentation de l'efficacité.

Pour les faisceaux d'argon, une efficacité de 11,5% a été mesurée pour l' Ar^{8+} , dans le cas du rubidium, le gain est spectaculaire, en effet l'efficacité pour le Rb^{15+} est passée de 3,4% à 6%.

Conception mécanique détaillée du booster de charge nucléarisé

La conception mécanique du booster est prise en charge par le Service Études et Réalisations Mécaniques, des modifications ont été effectuées pour prendre en compte les progrès issus de la R&D (changement de l'hexapole, suppression du tube ralentisseur). L'effort est maintenant porté sur l'étude détaillée de chaque élément constituant le module booster, tout en prenant en compte les impératifs liés aux opérations de maintenance, ou de ceux liés à l'intégration dans le procédé ainsi que dans le bâtiment de production. Une vue d'ensemble du module booster tel que défini est représentée Fig. 4.

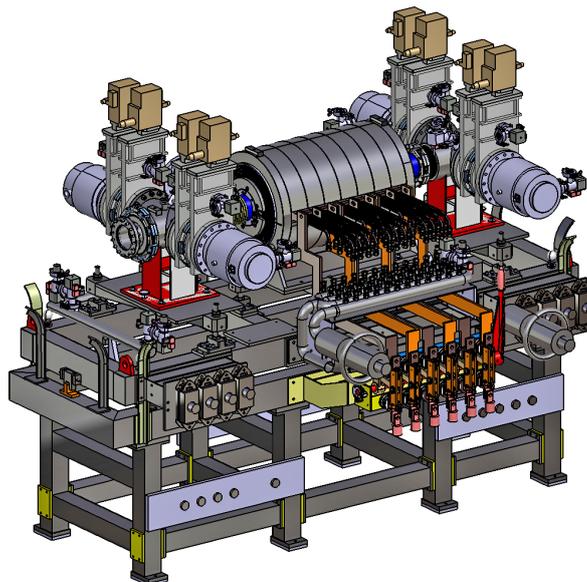


Fig. 4: Vue d'ensemble de la mécanique du Booster de charge SPIRAL2.

Ligne n+ «analyse booster»

Cette ligne située en aval du booster de charge réalise l'analyse et la compensation du faisceau extrait de ce booster avant son transport vers le synchrotron CIME du GANIL existant. Elle assure également une fonction géométrique de changement de niveau altimétrique du faisceau, l'entrée et la sortie de cette ligne étant situées respectivement aux niveaux -9,30 m et -3,25 m. En conséquence une grande partie de la ligne est verticale et deux dipôles de déviation à 90° dans le plan vertical sont utilisés. Le LPSC s'est vu confié la conception de cette ligne en avril 2011.

Pour la conception mécanique, les travaux, effectués par le Service Études et Réalisations Mécaniques, ont principalement porté sur l'intégration dans le bâtiment des 7 modules constituant la ligne tout en respectant les exigences de circulation des personnels et de manipulation aisée des modules (installation des modules, maintenance locale, transport de/vers un autre local). Pour la partie verticale de cette ligne, ces exigences ont conduit à positionner les modules sur des plateformes équipées de rails de translation. La mise en place et l'évacuation d'un de ces modules est alors permise par sa translation sur les rails et manipulation à l'aide d'un pont-roulant. Ces opérations sont à réaliser dans un espace réduit, leur cinématique (absence de collision) a donc été simulée et validée. La définition de chaque module a également commencé (maquette des chambres à vide, des structures, mise en place des équipements...)

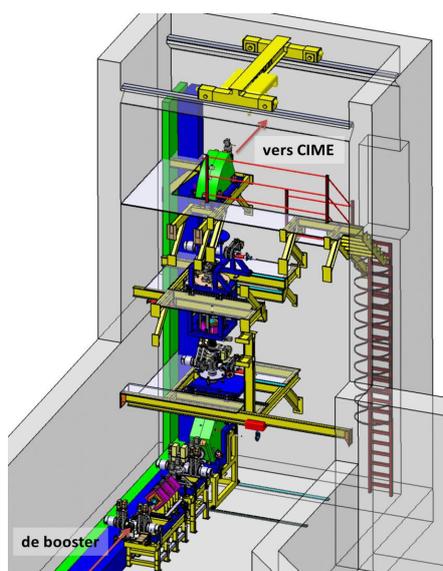


Fig. 5: Ligne N+AB intégrée dans le bâtiment de production.

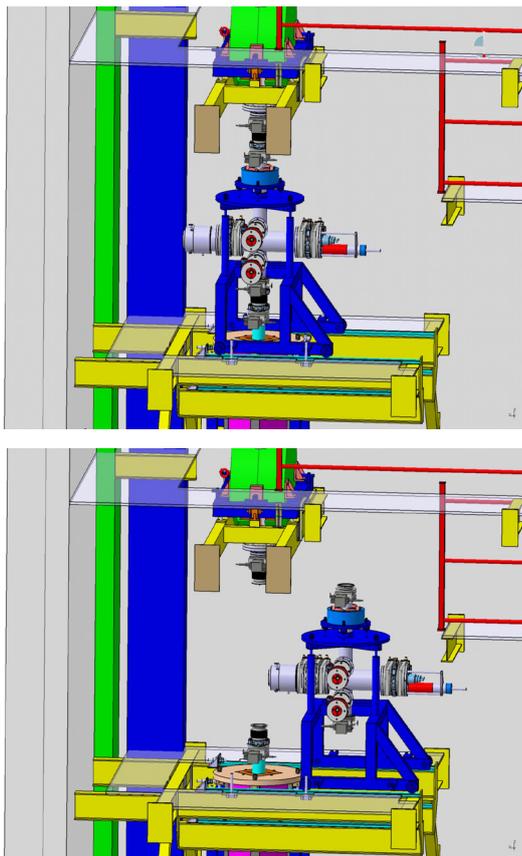


Fig. 6 : Un module en position de fonctionnement et en position translatée pour manipulation.

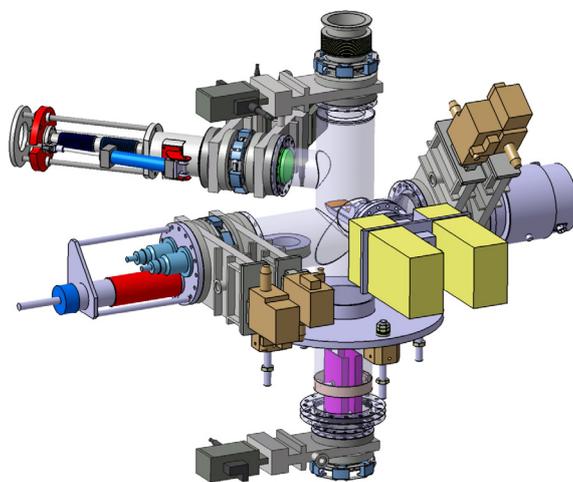


Fig. 7 : Exemple, pour l'un des modules, d'une chambre à vide équipée.

Pour la dynamique faisceau, les travaux débutés par le LPSC ont été repris par le GANIL pour consolidation. À ce jour, la structure optique retenue semble répondre aux exigences fonctionnelles de la ligne.

Pour le contrôle-commande, le logiciel EPICS a été retenu par le GANIL. En vue de réaliser les applications de contrôle-commande de la ligne N+ « Analyse Booster », le LPSC a débuté des actions de formation et de prise en main. En particulier une application de communication / pilotage d'un appareil simple a été réalisée.

La bonne conduite du projet implique de nombreux échanges qui ont été formalisés entre autres par des réunions périodiques d'avancement avec le GANIL et la participation à des réunions/Workshops SPIRAL2 phase 2. Les documents et les maquettes mécaniques réalisés par le LPSC sont respectivement sous EDMS et Catia/SmarTeam. Ces éléments sont donc rendus accessibles à tout acteur en ayant l'usage.

L'accélérateur GENEPI-3C pour le programme ADS GUINEVERE

M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, J.-M. De Conto, E. Froidefond, Y. Gómez-Martínez, E. Labussière, M.L. Lombard, R. Micoud, M. Planet, Service Accélérateurs

A. Billebaud, S. Chabod, H.E. Thyébault, Groupe Physique des Réacteurs

C. Barruel, J. Bouvier, J.L. Bouly, D. Tourrés, Service Électronique

D. Bondoux, Y. Carcagno, G. Damieux-Verdeau, J.-C. Malacour, D. Marchand, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques

G. Dargaud, Service Informatique

M. Heusch, Service Détecteurs et Instrumentation

IPNO, IPHC/DRS, LPC Caen, SCK•CEN (Belgique), CEA/DEN, Cadarache

The GUINEVERE project couples a fast nuclear core at SCK•CEN (Belgium) to a versatile neutron generator. The GENEPI-3C accelerator, developed by IN2P3, provides the external neutron source. In collaboration with IPNO, IPHC/DRS and LPC Caen, LPSC designed and built the accelerator. The machine was assembled in Belgium where it was commissioned in 2010. The first coupling with the reactor was reached in october 2011.

Dans le cadre des études sur les réacteurs pilotés par accélérateur ou Accelerator Driven System (ADS), destinés à l'incinération des actinides mineurs, le LPSC travaille sur le développement, la mise au point et l'exploitation d'une maquette expérimentale. Le programme GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VENus REactor) réalise le couplage du réacteur nucléaire rapide VENUS-F du SCK•CEN (Mol, Belgique) avec une source externe de neutrons fournie par l'accélérateur GENEPI-3C. Cette nouvelle machine a été conçue, développée et mise en œuvre par le LPSC en collaboration avec l'IPN Orsay, l'IPHC/DRS et le LPC Caen de l'IN2P3.

Commissioning de l'accélérateur

Le GENérateur de NEutrons Pulsé Intense-3C (GENEPI-3C) est un accélérateur électrostatique de deutons produisant des neutrons par irradiation d'une cible de tritium. Les deutons produits par la source d'ions sont transportés horizontalement, déviés par un dipôle dans le plan vertical puis acheminés sur la cible placée au centre du cœur du réacteur. Après avoir dirigé la conception, le développement et la construction de la machine, le Service des Accélérateurs assure sa mise en œuvre et son exploitation sur le site de Mol.

L'accélérateur dans son intégralité a été assemblé et testé sur le site du LPSC en 2009. Cette importante étape du projet a permis de valider le fonctionnement et le pilotage des équipements, le transport et la caractérisation des faisceaux et le mouvement des sections mobiles. Après démontage et transfert vers la Belgique, l'accélérateur a été réassemblé sur le site du SCK•CEN de septembre 2009 jusqu'en mars 2010. L'installation expérimentale de GUINEVERE a été inaugurée officiellement par les ministres belges de la recherche et de l'énergie le 4 mars 2010. A suivi son passage en zone nucléaire contrôlée autorisant ainsi la première production de faisceau sur le site et donc le lancement de la mise en œuvre de l'accélérateur. Dans un premier temps, le fonctionnement de GENEPI-3C a été validé dans un mode « accélérateur seul », c'est-à-dire sans le réacteur (cœur non chargé). Ce « commissioning » de la machine a été effectué dans les différents modes de faisceau, par étapes rythmées par l'obtention des autorisations de sûreté belges. Les réglages de l'accélérateur obtenus au LPSC ont été retrouvés, confirmant la reproductibilité attendue du comportement de la machine. Le refroidissement de la cible a été démontré pour la pleine puissance du faisceau (250 W en mode DC) sur une cible inerte. Une fois la machine validée avec une cible inerte, l'autorisation de montage d'une cible tritiée a ouvert la voie à la première production de neutrons de l'installation en septembre 2010.

L'analyse de cette production neutronique par les physiciens a confirmé l'atteinte des objectifs de GENEPI-3C ($\sim 10^8$ neutrons.s⁻¹. μ A⁻¹) en mode continu pour une cible neuve. Puis les collègues du SCK•CEN ont effectué le chargement du cœur de VENUS-F et réalisé les premières expériences en configuration critique. L'installation a alors été modifiée pour retrouver la configuration sous-critique nécessaire à l'introduction de la ligne de faisceau dans le cœur. Enfin suite aux dernières autorisations concernant l'émission de rejets tritiés et le couplage de l'accélérateur avec le réacteur obtenues en septembre 2011, le premier couplage a été effectué avec succès en octobre 2011. La puissance du réacteur a été pilotée par l'accélérateur : une puissance de réacteur de 5 W a été déterminée pour un faisceau pulsé à une cadence de 1 kHz. Depuis, l'exploitation de l'installation est en cours pour la campagne expérimentale de physique dans les 3 modes de faisceau.

Réalisations

La spécificité de ce nouvel accélérateur réside dans ses différents modes de fonctionnement, requis pour assurer le programme expérimental: en plus d'un mode produisant des paquets de faisceau intenses (~ 40 mA crête) et courts (~ 1 μ s), il doit également pouvoir fonctionner de manière continue. Enfin, des interruptions rapides ($\sim \mu$ s) de fréquence et de durée ajustables doivent être programmées dans ce mode continu de faisceau. La source, de type duoplasmatron, est bien adaptée au mode de fonctionnement pulsé. Son fonctionnement continu a été étudié sur un banc de test spécifique au LPSC, en parallèle avec la mise en œuvre de l'accélérateur en mode pulsé au LPSC puis au SCK•CEN. Après avoir généré des faisceaux continus et des interruptions, ces développements ont permis l'optimisation du mode continu pour les expériences: courant intense, interruptions brèves (quelques μ s de temps de coupure), domaines d'applications des interruptions. Le système de programmation des coupures de faisceau a alors été mis en œuvre sur GENEPI-3C pendant la phase de commissioning de la machine.

Le filament de la source duoplasmatron, à l'origine de l'ionisation du Deutérium, représente une pièce maîtresse de l'accélérateur. Les filaments sont fabriqués et préparés par le Service Détecteurs et Instrumentation, avant d'être conditionnés sur un banc spécifique.

La ligne de faisceau verticale est équipée d'un diagnostic de mesure du courant de faisceau. Ce diagnostic spécifique, entièrement conçu et réalisé par le Service Études et Réalisations Mécaniques, utilise des conducteurs pouvant être déplacés dans le plan normal à l'axe du faisceau. À cet effet, des moteurs pas à pas implantés dans l'enceinte à vide sont utilisés. En 2010, la conception des connexions électriques et de leurs cheminements a été complètement modifiée afin de faciliter d'éventuelles opérations de maintenance. Les pièces nécessaires à la mise en œuvre de cette nouvelle conception ont été pour une part fabriquées et pour l'autre part approvisionnées. Ces modifications seront implémentées sur la machine GENEPI-3C lors d'un prochain arrêt.

Le système de contrôle-commande de l'accélérateur, essayé une première fois lors des tests au LPSC en 2009, a été démonté puis remonté sur le site de Mol. Il a été validé entièrement lors des tests de qualification sur ce nouveau site. Durant ces essais, le système de contrôle-commande a été amélioré au niveau fonctionnel: de nombreuses procédures ont été automatisées nécessitant des développements logiciels.

De nouvelles fonctionnalités hardwares ont également été installées ou améliorées. Nous avons installé un nouveau tiroir «interlock», autorisant la mise en route de l'accélérateur lorsque toutes les conditions de sécurité sont réunies. Ce tiroir dispose d'une fonction maître/esclave pour permettre de contrôler les sécurités depuis plusieurs endroits. La salle de contrôle de l'accélérateur et celle du réacteur ont chacune été équipée d'un tiroir de ce type. Des alimentations de polarisation à 200 V ont été développées et implantées au niveau de la cible, du collimateur et des deux axes du diagnostic de faisceau D2.

Un nouveau tiroir dédié à la mesure du courant sur la cible et sur le collimateur ainsi qu'à la génération de pulsation a été développé, avec son software associé. Celui-ci, basé sur le même principe que les autres tiroirs du système de contrôle-commande, intègre un circuit FPGA comprenant en son sein un processeur de type PowerPC utilisant un système d'exploitation Scientific Linux. Ce tiroir permet d'analyser le courant intercepté sur la cible et sur le collimateur et de fournir au système de contrôle commande les caractéristiques du faisceau (intensité du courant, profil temporel, fréquence, intégration de la charge déposée). D'autre part, le tiroir génère les signaux pour la pulsation du faisceau.

Exploitation

La mise en œuvre et l'exploitation de l'accélérateur auprès du réacteur VENUS-F sont en cours d'études dans le cadre du programme européen MAX (MYRRHA Accelerator eXperiment) du 7^e PCRDT. L'objectif est de tirer profit du retour d'expérience du couplage de GENEPI-3C avec VENUS-F, pour le projet MYRRHA. Porté par le SCK•CEN, le projet MYRRHA (Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) propose le couplage d'un faisceau de protons multi-MW avec un réacteur de 50-100 MW_{th} pour démontrer la faisabilité d'un ADS de puissance et offrir une source d'irradiation neutronique, à l'horizon 2025.

Des études sur l'émission électronique spontanée sous effet d'un champ intense sont également en cours dans le cadre du projet MAX en collaboration avec l'IPNO.

Pour en savoir plus

A versatile neutron source for the low power ADS GUINEVERE, M. Baylac et al., proceedings to the 10th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators (AccApp'11), Knoxville, TN (USA), April 3-7, 2011



Fig. 1: L'accélérateur GENEPI-3C sur le site du SCK•CEN (Belgique) au niveau supérieur pendant l'insertion de la ligne verticale de faisceau dans la casemate du réacteur.

GENEPI-2

M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, J.-M. De Conto, R. Micoud, M. Planet, Service Accélérateurs

J. Médard, P. Sortais, Service des Sources d'Ions

A. Billebaud, G. Kessedjian, Groupe Physique des Réacteurs

T. Malkiewicz, M. Ramdhane, G. Simpson, Groupe Structure nucléaire

D. Marchand, Service Études et Réalisations Mécaniques

W. Regairaz, Service Sécurité

GANIL

The GENEPI-2 accelerator operated at LPSC produces 2.5 MeV or 14 MeV neutrons for physics experiment. Several actions were undertaken to optimize the facility. Two experiments were run : material irradiation for a proof of principle experiment and mass detection of fission product from ^{232}Th with a dedicated spectrometer.

GENEPI-2 (Générateur de NEutrons Pulsé Intense) est un accélérateur électrostatique de deutons produisant des champs neutroniques de 2,5 MeV ou 14 MeV par irradiation d'une cible de Deutérium ou de Tritium respectivement. Des modifications de l'installation expérimentale ont été entreprises dans le but d'améliorer et de fiabiliser son fonctionnement : optimisation des masses dans la tête haute tension, fiabilisation de la production de faisceau à haute cadence, vidage du stockage d'effluents tritiés, nettoyage et élargissement de la casemate accélérateur, protection du sol de la cage de Faraday.

Deux expériences de physique ont eu lieu sur la période 2010-2011 auprès de GENEPI2. La première s'est consacrée à des irradiations de matériaux. Elle avait pour but à la fois de déterminer le flux de neutrons de 2,5 MeV de GENEPI-2 et de démontrer la faisabilité d'expériences de radioprotection et des mesures de rendement de fission pour le projet SPIRAL2. L'irradiation a concerné des échantillons d'indium et de nickel qui ont ensuite été caractérisés dans le laboratoire de travaux pratiques du LPSC. Le flux a été mesuré en excellent accord avec les valeurs simulées par le groupe de physique des réacteurs.

La seconde expérience s'est intéressée à la distribution de masse des PF créés par l'impact des neutrons de 14 MeV sur une cible de ^{232}Th réalisée sur une machine de sputtering développée par le service des sources d'ions, le but étant de caractériser finement cette distribution encore mal connue. Ces données présentent un intérêt pour les réacteurs nucléaires du futur basés sur le cycle du thorium. La campagne expérimentale a été menée par un groupe de l'université de Manchester. L'installation expérimentale de GENEPI-2 a été modifiée pour accueillir le spectromètre STEFF (SpecTrometer for Exotic Fission Fragments) permettant la caractérisation des PF (Fig. 1). Le spectromètre STEFF est équipé de deux-bras, permettant des mesures de temps de vol, et de chambres d'ionisation de Bragg. La masse des deux PF est déterminée grâce aux mesures de leur vitesse, obtenues par temps de vol, et de leur énergie, identifiée par les chambres de Bragg.

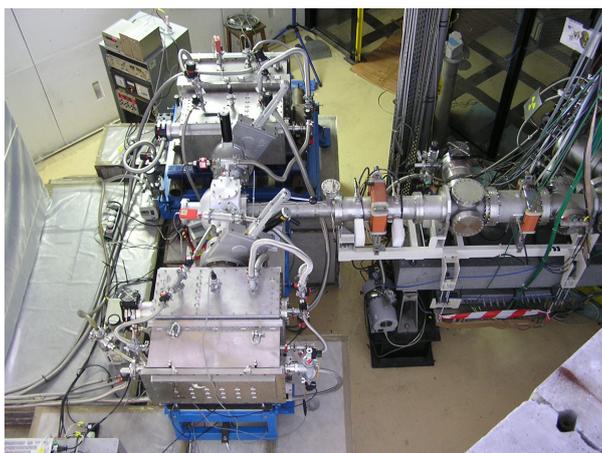


Fig. 1 : Spectromètre STEFF installé auprès de l'accélérateur GENEPI-2 en bout de la ligne de faisceau.

Prototype de source d'ions ECR à 60 GHz

J. Jacob, T. Lamy, L. Latrasse, M. Marie-Jeanne, J. Morfin, T. Thuillier, P. Sole, P. Sortais, J.-L. Vieux-Rochaz
 G. Calogero, G. Damieux, C. Fourel, J. Giraud, D. Grondin, S. Roudier, S. Roni, Service Études et Réalisations Mécaniques
 P. Roisin, Services Généraux
 W. Regairaz, Service Sécurité
 Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses

The improvements of the ECR ion sources performances can be obtained by the increase of the frequency of the microwaves injected in the system. We have developed the first magnetic structure in the world being able to apply a 60 GHz resonance frequency to ECR ion sources. Until now, this magnetic structure has been experimentally validated for a 28 GHz operation.

Cette activité se déroule actuellement dans le cadre du contrat Euro-nu (FP7) qui regroupe 3 projets, au stade des études de conception, en vue de la future réalisation d'un accélérateur produisant des faisceaux de neutrinos au niveau européen. Pour le projet Beta-Beam qui utilise la désintégration β^- de noyaux radioactifs accélérés et stockés dans un anneau, nous développons un prototype de source d'ions utilisant la plus haute fréquence ECR du monde ainsi que la plus forte puissance de micro-ondes. Ce projet est en collaboration avec le Laboratoire National des Champs magnétiques Intenses de Grenoble.

Ce prototype de source doit produire, à partir d'un flux continu d'atomes radioactifs (5×10^{13} pps), des faisceaux d'ions pulsés, de largeur 100 μs avec un taux de répétition de 10 Hz.

En 2010, l'assemblage a été terminé grâce à une forte contribution du Service Études et Réalisations Mécaniques du laboratoire. On peut voir Fig. 1 le prototype assemblé, une vue en coupe (Fig. 2) montre les 4 hélices à refroidissement radial pouvant accepter une intensité de 30000 A, qui constituent la structure magnétique du prototype.



Fig. 1: Source d'ions ECR à 60 GHz assemblée.

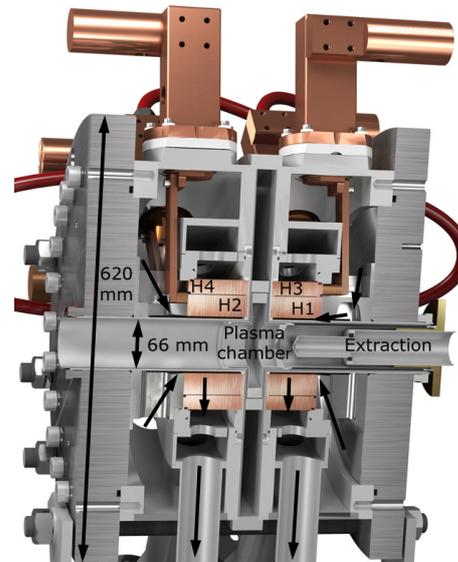


Fig. 2: Vue en coupe du prototype de source d'ions ECR à 60 GHz.

Après modification du site de l'aimant M5 au LNCMI afin d'assurer les connexions hydrauliques et électriques avec des câbles refroidis (Fig. 3), les inductions magnétiques radiale et axiale ont été mesurées à l'aide de sondes de Hall, le long de 3 axes horizontaux du prototype et le long d'un axe vertical pour des courants de 1500 à 15000 A. À 15000 A, sur l'axe optique du prototype, le champ est purement axial et les extrema sont de 3,32 T pour l'injection et de 1,57 T pour l'extraction.



Fig. 3: Prototype installé sur le site M5 pour les mesures de champ magnétique.

Afin de valider nos mesures, l'équipe du LNCMI a effectué une mesure de champ à faible courant (146,25 A) à l'aide d'un nouveau dispositif basé sur l'intégration de la variation de flux. Ce système consiste en une petite bobine de « pick up » qui se déplace le long de l'axe, le mouvement est assuré par un moteur piézoélectrique linéaire, la mesure de position par un codeur linéaire. Un intégrateur digital reçoit les signaux de la variation de flux et du codeur, une fois les données traitées on obtient l'induction magnétique en fonction de la position. La comparaison entre les mesures par sonde de hall à 15000 A (valeurs divisées par 105) et cette dernière méthode est reportée Fig. 4. On remarque un très bon accord entre ces deux mesures en termes d'intensité et pour la position des extrema.

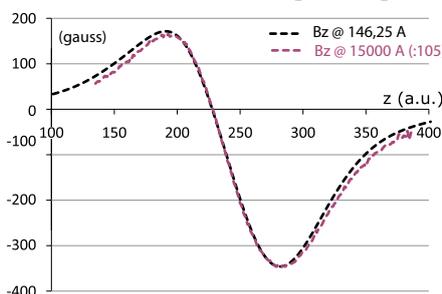


Fig. 4: Comparaison des mesures de l'induction magnétique par sondes de Hall (courbe marron) et par intégration des variations de flux (courbe noire).

Enfin, ce qui est important pour le fonctionnement du prototype en tant que source ECR, c'est d'avoir une zone de résonance fermée n'interceptant pas les parois. Sur la Fig. 5 on représente une coupe des iso-B dans la chambre à plasma (symbolisée par les parties grisées), dans un plan horizontal pour 15000 A. On remarquera que la résonance à 28 GHz (1T) satisfait totalement les critères pour une source ECR. La prochaine étape sera donc de qualifier le prototype en tant que source d'ions pour cette fréquence de 28 GHz.

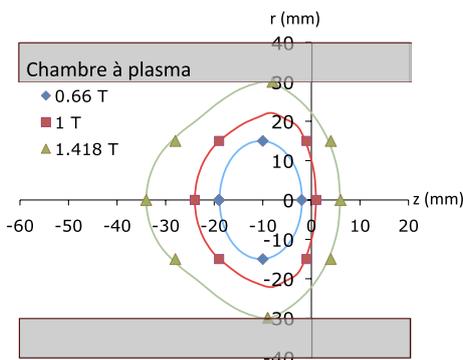


Fig. 5: Courbes Iso-B dans un plan horizontal.

Sur le plus long terme, le LPSC a soumis en 2011 un Equipex (COLOSSECRIS) intégrant le LNCMI, le GANIL et l'IPNL. Ce projet a deux objectifs :

- Réaliser une source ECR de hautes performances, entièrement supraconductrice et fonctionnant à 28 GHz, pour le projet SPIRAL2.
- Amener la puissance électrique ($4 \times 15000 \text{ A} / 400 \text{ V}$) du LNCMI au LPSC, au moyen de câbles supraconducteurs (MgB_2) insérés dans deux cryostats refroidis à 20 K, afin d'établir une plateforme de recherche et développement sur les sources d'ions à haute fréquence ($\geq 28 \text{ GHz}$) et pour les projets d'aimants splittés pour la science en conditions extrêmes à l'ESRF et à l'ILL. Le schéma de cette installation est reporté Fig. 6.

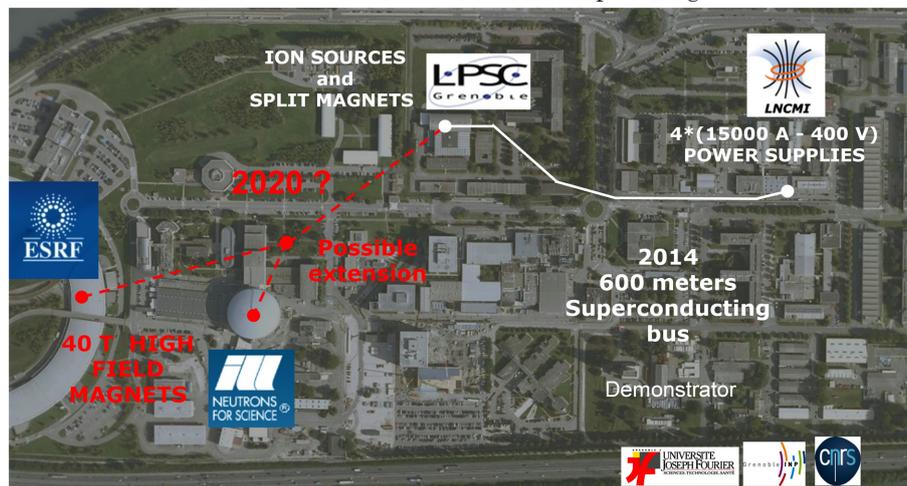


Fig. 6: Schéma du bus supraconducteur de COLOSSECRIS.

Applications des sources d'ions

Le sputtering multifaisceaux

P. Sortais, T. Lamy, J. Médard, L. Bonny, J. Angot

S. Roudier, D. Fombaron, Service Études Réalisations Mécaniques

The ultimate miniaturization of 2.45 GHz ion sources (Source COMIC) allows many applications like surface deposition, the production of targets for fundamental physics, the simplification of the production of metallic ion beams. New very promising results have been obtained. On the opposite side, large volume 2.45 GHz ECR ion sources are interesting for extremely intense light ion beams production.

Sources d'ions pour la pulvérisation par faisceaux d'ions (Machine MBS)

Suite au développement des sources ultra compactes COMIC il a été possible de mettre en œuvre un nouveau principe de pulvérisation qui consiste à utiliser plusieurs petites sources d'ions, extrêmement simples et fiables, au lieu d'une source unique très puissante et de grandes dimensions. La grande liberté de la position relative entre ces petites sources et la cible permet de redéfinir totalement la géométrie de la machine en la rendant beaucoup plus compacte: un facteur dix en volume et un facteur 4 en coût, par rapport à une machine utilisant des sources dites « faisceau large ».

- État de l'art: L'Ion Beam Sputtering (IBS) permet de pulvériser n'importe quel type d'élément et, de par le réglage de l'intensité du faisceau d'ions, de contrôler finement les taux de pulvérisation. Par ailleurs la qualité des couches produites est excellente (uniformité, dureté, faible rugosité, adhérence...). Afin d'atteindre de bonnes uniformités, il est nécessaire d'utiliser des sources d'ions délivrant des faisceaux de grand diamètre (relativement à la dimension du substrat à traiter), et qui en conséquence ont des dimensions mécaniques importantes. Ceci contraint à l'utilisation d'enceintes de grandes dimensions (quelques m³ sous vide), pour des dimensions de substrats de l'ordre de 200 à 400 mm. La qualité des dépôts est garantie mais le coût et les temps de maintenance de la source et de son enceinte limitent cette technologie à des dépôts à très forte valeur ajoutée (optique laser, disque dur...).

- La technologie MBS (pour Multi Beam Sputtering) se propose de fournir des machines présentant la souplesse d'utilisation d'un IBS avec la simplicité d'emploi d'un magnétron. De plus cette technologie peut procéder de manière triviale à de la co-évaporation avec une bonne maîtrise de la stœchiométrie. Pour parvenir à ce résultat, le cœur de l'invention consiste à remplacer une source unique, demandant beaucoup de maintenance et présentant des contraintes dimensionnelles, en une multitude de petites sources bien optimisées et placées librement autour des cibles de pulvérisation. Ceci apporte un nouveau degré de liberté qui a pour conséquence d'autoriser un contrôle facile du profil de dépôt et de simplifier drastiquement les conditions de maintenance. Cette géométrie particulière a fait l'objet d'un dépôt de brevet spécifique début 2011 en plus de celui qui couvre les sources COMIC.

Le démonstrateur actuel, développé grâce au soutien de GRAVIT, est optimisé pour des substrats de 100 à 200 mm avec 20 sources indépendantes (MBS-20), mais, comme pour des décharges magnétron, il serait possible de définir des machines de dimensions et de formes quelconques (circulaires ou linéaires avec un nombre quelconque de sources). On peut voir, Fig. 1, 10 des 20 faisceaux possibles impactant 10 lamelles de Tantale dans une atmosphère d'Oxygène. Les premiers dépôts sur 200 mm en Ta₂O₅ (en cours de caractérisation) montrent que ce type de machine est désormais opérationnel. Sur le prototype précédent, avait déjà été réalisée, pour le compte de l'expérience STEF du groupe « Structure Nucléaire » du laboratoire, une cible de Thorium opérationnelle de 100 nm d'épaisseur sur un support en mylar de 0,5 µm (Fig. 2). L'éloignement du substrat et l'absence de dépôts d'énergie durant la pulvérisation, permet de faire des dépôts quelconques y compris sur des substrats extrêmement fragiles.

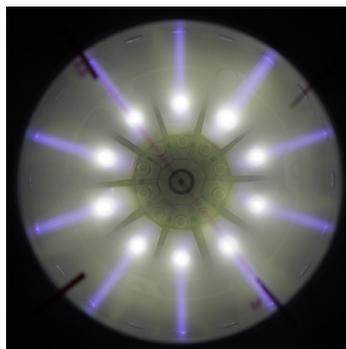


Fig. 1 : 10 faisceaux convergents sur des cibles tantale sous atmosphère d'oxygène (machine MBS-20, impacts faisceaux sur le diamètre intérieur de 7 cm).

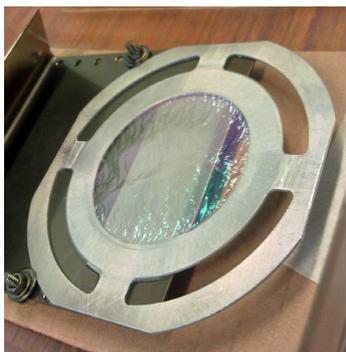


Fig. 2 : Cible de Thorium pour l'expérience STEF (env. 100 nm) sur mylar de 0,5 μm .

Application de la Source COMIC à la production de faisceaux d'ions métalliques

J. Angot, P. Sortais, T. Lamy

La suppression du tube ralentisseur du booster de charge nous a permis d'envisager l'injection de faisceaux intenses dans le booster. Nous avons imaginé une nouvelle méthode de production de faisceaux d'ions métalliques, en particulier pour les éléments réfractaires, qui ne peuvent pas être produits à partir d'un four. En injectant un faisceau intense d'ions gazeux avec suffisamment d'énergie (quelques kV), la plupart des ions de ce faisceau iront percuter l'électrode plasma, sur laquelle on a placé un disque du matériau réfractaire, et iront arracher des atomes neutres du disque qui iront en direction du plasma pour être probablement multi-ionisés puis extraits. Pour démontrer la faisabilité de cette méthode, nous avons injecté un faisceau de 150 μA d'Ar extrait de la source COMIC et installé un disque de tantale, le spectre d'ions tantale multichargés se trouve Fig. 3. Du fait de l'absence de système thermique ou d'insert dans le plasma, cette méthode de production présente une très bonne stabilité.

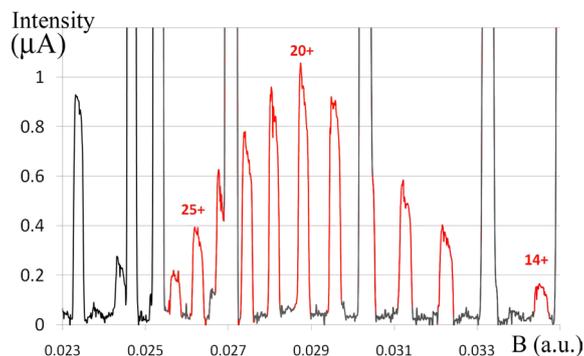


Fig. 3 : Spectre d'ions multichargés Ta obtenus par sputtering dans le booster.

Pour le booster de charge lui-même il est essentiel de pouvoir produire des faisceaux d'ions métalliques monochargés d'une grande stabilité et d'une grande reproductibilité avec une intensité bien maîtrisée. Pour cela nous avons commencé une étude avec pour objectif de développer une version chaude (600°C dans un premier temps) de la source COMIC. Lorsque celle-ci sera construite et testée, et donc lorsque les choix techniques pour cette source seront validés, une version plus chaude (1200°C) sera développée afin d'étendre son utilisation à d'autres éléments.

R&D Source d'ions ECR 2,45 GHz de grand volume

J. Angot, A. Coly, J. Jacob, T. Lamy, J. Morfin, P. Sortais, P. Sole, J.-L. Vieux-rochaz, T. Thuillier
C. Fourel, J. Giraud, G. Calogero, G. Damieux, S. Roudier, S. Roni, Service Études et Réalisations Mécaniques
Pantechnik, Bayeux, France.

L'activité de recherche et développement sur les sources d'ions ECR de grand volume à la fréquence 2,45 GHz a été menée jusqu'en décembre 2010 en collaboration avec la société Pantechnik avec pour objectif la production de faisceaux intenses d'ions légers. Dans ce cadre, une BDI a été menée par A. Coly au sein du service des sources d'ions. Des études originales ont été réalisées avec la source MONO1000, conçue par le GANIL et sous licence Pantechnik, qui a été modifiée pour la circonstance (Fig. 4). Le résultat majeur de l'étude est la démonstration expérimentale de la production de très fortes densités de courant de protons, jusqu'à 95 A/mm², ce qui place cette source pratiquement au même niveau de performance que la source SILHI (CEA/Saclay) qui est la référence mondiale du domaine. L'avantage de la source MONO1000 modifiée, est de pouvoir fonctionner à plus basse pression de gaz et donc de pouvoir régler à

volonté l'intensité désirée d'ions de 0 à I_{max} . Cela est essentiellement dû à la présence pour MONO1000 d'une surface de résonance ECR fermée et d'une structure à minimum $|B|$.

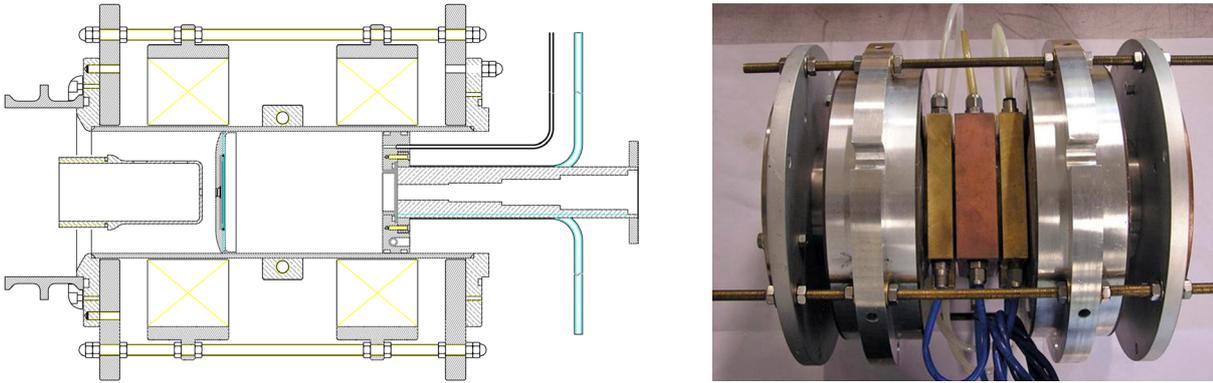


Fig. 4: À gauche: vue en coupe de la source MONO1000 modifiée pour les essais au LPSC. À droite: photo de l'ensemble.

Un deuxième prototype de source d'ions dénommé SPEED, a été conçu et développé pendant la thèse (BDI) d'A. Coly. La spécificité de SPEED est une structure magnétique originale qui permet d'obtenir un minimum- $|B|$ avec une extraction des ions dans un champ magnétique dipolaire, ce qui permet de séparer immédiatement les espèces ioniques produites en sortie de source et de réduire ainsi les effets de charge d'espace. Les mesures expérimentales ont confirmé les prédictions des trajectoires d'extraction dans le champ dipolaire. Le fonctionnement de la source en protons s'est cependant révélé décevant en termes d'intensité produite. On observe en effet une production majoritaire d'ions H_3^+ , ce qui révèle un chauffage inefficace des électrons du plasma, sans doute dû à un couplage HF inapproprié dans la cavité, ce qui est fréquent à 2,45 GHz. Des propositions d'améliorations de la source ont été proposées mais non testées expérimentalement. L'activité s'est arrêtée avec la soutenance de la thèse d'A. Coly, faute de ressources pour poursuivre le programme expérimental.

Autres projets et activités

*M. Baylac, J.-M. De Conto, N. Monseu
O. Bourrion, C. Vescovi, D. Tourrés, Service Électronique*

The SUPERB project will be an e⁺/e⁻ circular collider. LPSC studies the beam polarization transport in the machine and low level RF system. RFTech is a network activity within EUCARD. It aims to federate scientific exchanges between RF experts (cavities, low-level, amplifiers etc).

Études pour le projet SUPER B

La détermination de la polarisation du faisceau de SuperB est un sujet de première importance. Un travail a été entrepris par le biais d'une thèse. L'originalité consiste à utiliser un code particulière pour déterminer le champ invariant de spin sur un tour. Cet invariant permet de déduire la polarisation réelle du faisceau en incluant les effets de rayonnement, sans pour autant devoir simuler celui-ci. Ce code a l'avantage d'intégrer les trajectoires dans des champs réalistes. L'enjeu est, par contre, d'extraire l'information dans des temps de calculs raisonnables et, bien sûr, de valider la méthode proposée pour la ré-utiliser ultérieurement pour d'autres machines.

Depuis fin 2009, le service électronique du LPSC est impliqué dans l'étude de l'électronique Low Level RF de l'anneau de stockage de SuperB. Il s'agit de définir l'électronique de contrôle pilotant les klystrons qui alimentent les cavités accélératrices. Initialement, ce travail a consisté en une étude bibliographique des solutions à l'état de l'art pour les synchrotrons à faisceau intense. Par la suite, une proposition d'architecture électronique innovante a été faite à la collaboration superB. Actuellement un travail de modélisation et de simulation des interactions cavité, faisceau et électronique de contrôle est en cours. Cet outil servira à faire des prédictions sur les performances du système LLRF et à fournir des outils d'optimisation des paramètres.

RF Tech

RFTech est une activité financée dans le cadre du programme européen EUCARD. Elle permet, par des activités de réseau, de financer des ateliers et par là même des échanges scientifiques entre experts du domaine. Deux ateliers ont eu lieu (Hambourg 2009, Villigen 2010) et le prochain sera à Rostock (décembre 2011). Les thèmes abordés portent sur les cavités radiofréquence, l'électronique de bas-niveau, la modélisation électromagnétique et les amplificateurs de puissance (à état solide notamment).

Fabrication des nappes polaires pour le PS

*M. Baylac, P. Boge, E. Froidefond, R. Micoud
C. Deslorieux, Service Administratif
R. Faure, Service Détecteurs et Instrumentation
J.-P. Scordilis, Service Électronique*

LPSC is in charge of the contract for the production of the pole face windings for the main dipoles of the CERN Proton Synchrotron. The 120 windings are manufactured by French industry. A test bench was designed and built by LPSC to test the coils.

Dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France au CERN, le LPSC est responsable du suivi de fabrication de 120 nappes polaires destinées aux aimants dipolaires à fonctions combinées de l'accélérateur PS (Proton Synchrotron) du CERN. Ces nappes polaires sont des bobinages de cuivre moulés fournissant une correction de champ quadripolaire. Elles sont destinées au remplacement de celles déjà en place. Le cahier des charges, repris des anciennes fabrications, a été révisé afin d'améliorer la qualité de fabrication et diminuer les pertes.

Depuis la signature du contrat avec la société Sigmaphi, 12 nappes ont été fabriquées dont 5 ont été qualifiées comme pré-séries. Lors de cette phase, terminée début octobre 2011, la période de remise en état et de modification de l'outillage a pris plus de temps que prévu, et certains procédés ont du être modifiés, des composants changés. Par exemple, la tenue aux radiations de la résine époxy nécessite une polymérisation complète, qui n'était pas obtenue avec le précédent procédé de moulage. Ce projet a mis en lumière toute la difficulté de la reprise d'une fabrication, avec un cahier des charges modifié. Finalement, la qualité des nappes polaires a été sensiblement améliorée, et devrait permettre d'obtenir une durée de vie suffisante, dans la perspective de la prolongation de la durée de vie du PS.

Ce travail a été complété par l'étude et la réalisation d'un banc d'essai automatisé. Il servira à effectuer les essais de réception au CERN, qui incluent une partie seulement des essais réalisés par l'industriel. Le but est de vérifier que les nappes n'ont pas subi de dommage pendant le transport.

Colloque international ECRIS'10

Le LPSC a organisé en Août 2010 la 19^e édition du colloque international sur les sources d'ions (ECRIS'10) qui réunit tous les 2 ans les experts européens, américains, asiatiques et océaniques du domaine. Ce colloque a été organisé sous la responsabilité du service des sources d'ions, en étroite collaboration avec les services communication, administration et informatique. Le nombre total de participants était d'un peu plus de 100 personnes, ce qui témoigne d'une bonne attractivité par rapport aux précédentes éditions. Le congrès, organisé au World Trade Center de Grenoble, a été un franc succès si l'on considère le nombre de messages de félicitations envoyés par les participants à posteriori. Les actes scientifiques du colloque, édités par le LPSC en collaboration avec l'ESRF, ont été publiés sur le « Joint Accelerator Conferences Website» (<http://www.jacow.org/>).



Ouverture du colloque ECRIS'10 au World Trade Center de Grenoble.