

# Pôle accélérateurs de particules

Compte tenu de la synergie de leurs activités et compétences, les services «Accélérateurs» et «Sources d'ions» ont engagé une réflexion concernant leur rapprochement en vue de la formation d'un pôle. Cette démarche s'est amorcée depuis la fin 2008, les deux services se concertant déjà sur leurs projets scientifiques et leur stratégie. Il apparaît en effet que le regroupement des deux services permette, tout en s'appuyant sur les services techniques du laboratoire (Mécanique, Électronique, Informatique, Détecteurs et Instrumentation, Administration), de rassembler toutes les compétences nécessaires à la construction d'accélérateurs : radiofréquence, haute fréquence, optique ionique (magnétique et électrostatique), caractérisation optique des faisceaux, dynamique de faisceau, sources d'ions, champs magnétiques intenses, caractérisation magnétique, haute tension jusqu'à 250 kV, courants forts, ultra vide, alignement... La présentation des activités du pôle dans ce chapitre s'appuie sur cette logique.

Les thématiques du pôle sont la conception et la construction d'accélérateurs, de sources d'ions et la génération de plasmas pour la physique, mais aussi pour les applications industrielles et médicales. Les activités principales du pôle pendant la période 2008-2009 concernent les projets GUINEVERE et SPIRAL2. Au niveau

expérimental, le pôle comporte actuellement 8 accélérateurs électrostatiques pour la physique et la R&D, un laboratoire RF équipé d'une salle blanche, ainsi qu'une salle d'expériences dédiée aux traitements de surfaces par plasmas et faisceaux d'ions.

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), cosmologie (détecteurs de WIMPS), applications des faisceaux d'ions (hadronthérapie, implanteurs ioniques, analyse et traitement des surfaces), applications des plasmas (traitements de surface). Les activités de valorisation du pôle sont présentées dans le chapitre Valorisation et transferts de technologie de ce rapport.

Ouvert sur le monde extérieur, le pôle participe aux programmes européens depuis le FP5, en proposant le montage de collaborations internationales sur des sujets de pointe et en participant, en tant que porteur ou collaborateur, aux programmes de l'ANR.

# Projet SPIRAL2

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

C. Fourel, 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

Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences (Debrecen), KVI (Groningen), University of Jyväskylä

*The accelerators and ion sources pole is involved in the SPIRAL2 Project since the Design Study phase. Today, 3 teams are working on the construction of high level functionalities of the accelerator. The pole will deliver the heavy ion low energy beam line, assembled at LPSC, the  $Q/A=1/3$  final heavy ion source, the 30 RF couplers to feed the LINAC cavities and the ECR Charge breeder used to multi ionise radioactive ion beams produced after the target.*

Le projet SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne 2) est une extension du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) de Caen. SPIRAL2 est doté d'un accélérateur linéaire supraconducteur permettant d'accélérer au choix des faisceaux d'ions légers intenses vers une cible de production d'atomes radioactifs ou bien des faisceaux d'ions lourds stables vers une salle de physique équipée d'un spectromètre de nouvelle génération (collaboration S<sup>3</sup>). Les atomes radioactifs sont produits dans une casemate où ils sont ionisés une fois, ensuite ils sont multi-ionisés pour être accélérés vers des lignes d'analyse dédiées ou vers le GANIL existant. Le pôle accélérateurs et sources d'ions est responsable de plusieurs lots de tâches de premier ordre dans le projet SPIRAL2. Ainsi, le LPSC livrera au GANIL la source d'ions lourds définitive ( $Q/A=1/3$ ) ainsi que sa ligne basse énergie, la série des 30 coupleurs de puissance permettant d'injecter la puissance radiofréquence dans les cavités supraconductrices de l'accélérateur linéaire, et enfin le Booster de charge qui permet de multi-ioniser les ions radioactifs monochargés produits dans l'ensemble cible-source. La livraison des éléments de l'accélérateur d'ions stables, en 2012, approche à grands pas et l'activité bat son plein actuellement au pôle.

## Booster de charge

Durant cette période 2008-2009, un effort particulier a été fait concernant l'efficacité de multi-ionisation des ions légers. Le sodium  $1^+$  a été choisi comme ion de référence et a été produit à partir d'une source à ionisation de surface. Jusqu'à 1,9% de  $Na^{6+}$  a été observé, de même il a été constaté que l'injection de la molécule  $NaO^+$ , qui est dissociée dans le booster, permettait d'augmenter l'efficacité en  $Na^{n+}$  par rapport à celle obtenue lors de l'injection de  $Na^+$ . L'injection de rubidium monochargé a permis d'obtenir une efficacité de 3,6% sur le  $Rb^{15+}$  avec un temps de réponse de 70 ms (à comparer avec les valeurs précédemment obtenues: 5%, 225 ms). Ce résultat met en évidence que le réglage optimum en radioactifs, n'est pas forcé-

ment de la plus grande efficacité, mais est un compromis entre celle-ci et le temps de réponse, dépendant de la période de l'élément à multi-ioniser. Par la suite, le booster de charge a été entièrement démonté afin d'installer une chambre à plasma permettant l'injection de deux fréquences, 14 et 18 GHz (Fig. 1), de renforcer et symétriser le champ magnétique à l'injection, de renforcer l'isolement électrique et la résistance mécanique de l'ensemble. Lors du démontage, le champ magnétique de l'hexapole a été contrôlé et n'a pas montré de détérioration après presque 10 ans de fonctionnement du booster.

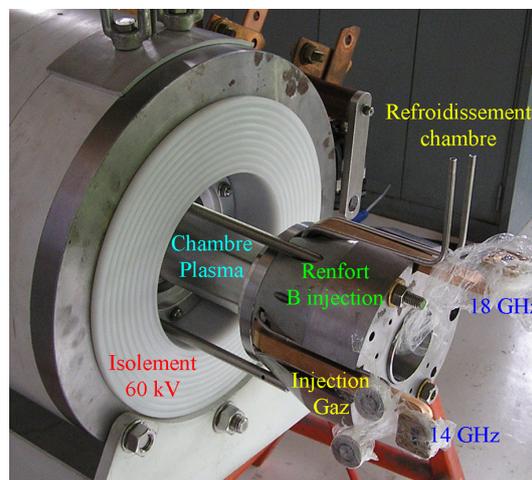


Fig. 1 : Nouvelle injection double fréquence, renfort du champ magnétique et de l'isolement du Booster de charge.

En parallèle, les premières études conceptuelles de maintenance du Booster de SPIRAL2 ont été menées, afin de faciliter celle-ci et de diminuer le temps d'intervention des personnels, le booster se trouvant en zone jaune où l'intervention humaine est possible mais doit être la plus rapide possible. Enfin, du fait de sa stabilité, de sa facilité de mise en œuvre et de sa très faible émittance, des premiers essais de production de faisceaux de rubidium mono-chargés avec la source COMIC ont été menés. Des premiers faisceaux ont été obtenus ; les résultats sont encou-

rageants, une R&D est en cours pour améliorer la stabilité nécessaire aux études  $1^+/n^+$ . Pour le booster, des calculs ont montré que la suppression du tube ralentisseur n'empêchait pas l'injection et le ralentissement du faisceau  $1^+$ . Cette nouvelle géométrie sera testée prochainement.

## Les coupleurs de puissance

Les coupleurs ont pour but principal de transférer la puissance des amplificateurs RF (88,05 MHz, 20 kW en continu) aux différents types de cavités accélératrices. Les coupleurs assurent aussi la transition entre l'air ambiant et le vide secondaire existant dans l'accélérateur mais également entre la température ambiante et la température cryogénique des cavités supraconductrices (4,2 K).

Le LPSC a réalisé la conception radiofréquence et technologique du coupleur et le test de deux prototypes, ainsi que la conception et le test d'un système de compensation des efforts barométriques et thermiques.



Fig. 2: Deux coupleurs prêts pour l'envoi.

Fig. 3: Neuf systèmes de compensation prêts pour l'envoi.

Aujourd'hui le LPSC est en charge de la réception, de la préparation et du test des 30 coupleurs de la machine. Ce travail qui durera jusqu'en 2011 inclut plus précisément :

- La réception des coupleurs: le contrôle dimensionnel, d'étanchéité, une mesure de la réflexion et de la transmission de la puissance avec pour finalité l'acceptation ou non du coupleur.
- La préparation des coupleurs: c'est une étape cruciale car les cavités supraconductrices doivent monter à des champs accélérateurs de 6,5 MV/m. Ainsi le coupleur est préparé en salle propre où il est nettoyé au bac à ultrasons, rincé à l'eau ultra pure et étuvé pendant 60 heures.
- Le conditionnement des coupleurs: le coupleur est soumis à la gamme complète des puissances qu'il doit transmettre à SPIRAL2.
- L'expédition des coupleurs: elle est réalisée dans un emballage spécial pour le protéger des chocs et garantir sa propreté.

## Source d'ions stables ( $Q/A=1/3$ ) et ligne basse énergie

### Ligne Basse Énergie

Le pôle, en 2008, a pris en charge la responsabilité de la construction et des tests de réception de la ligne basse énergie (LBE) Ions lourds de SPIRAL2, activité abandonnée par le CEA/IRFU. La LBE est un petit accélérateur à part entière, puisqu'elle contient la source d'ions multi-chargés  $Q/A=1/3$  ainsi que 14 mètres de ligne de faisceau permettant d'analyser les faisceaux extraits de la source d'ions (dipôle d'analyse), de les caractériser et de transporter le faisceau d'intérêt vers la première cavité radio fréquence (RFQ). La LBE, conçue conjointement par le GANIL, le CEA-IRFU et l'IPNO a été assemblée au LPSC entre les mois de juillet 2008 et juillet 2009. La LBE est le premier tronçon opérationnel de SPIRAL2; un premier faisceau d'ions a été transmis et analysé dans la ligne au mois de mai 2009. Ce jalon projet, réalisé au LPSC dans les délais, a fait l'objet d'une communication importante de la part de la direction de SPIRAL2. Les tests de validation de cette ligne et la préparation des faisceaux de la première année de SPIRAL2 se dérouleront en 2010, avant son déménagement final en 2011 au GANIL, à Caen.



Fig. 4: La ligne Basse Énergie Ions lourds de SPIRAL2 opérationnelle au LPSC (mai 2009).

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

Le pôle est responsable de la fourniture de la source d'ions lourds de l'accélérateur SPIRAL2. Le cahier des charges initial prévoit la production d'ions lourds jusqu'à la masse 40 avec un rapport masse sur charge de 3 ( $Q/A=1/3$ ) et une intensité de courant d'1 mA. Les états de charges élevés conjugués aux forts courants nécessitent l'utilisation d'une source d'ions ECR de nouvelle génération, totalement supraconductrice, chauffée à la fréquence de 28 GHz. Une source d'ions de ce type coûte environ 1,5 M€. Jusqu'à l'année 2008, la priorité affichée du projet était la production d'ions radioactifs à partir d'un faisceau de deutons produit par une source d'ions dédiée et la fourniture de la source  $Q/A=1/3$  n'était pas budgétée dans la version de base de l'accélérateur. Afin d'avoir au moins une source au démarrage, il est envisagé d'équiper SPIRAL2

de la source d'ions existante PHOENIX V2, propriété du LPSC, chauffée à 18 GHz. Cette source d'ions ne remplissant pas pleinement le cahier des charges de SPIRAL2 en termes de courants extraits, une activité de R&D est menée en parallèle à l'activité de test de la LBE sur la source A-PHOENIX. A-PHOENIX est une source hybride (2 solénoïdes supraconducteurs, 1 solénoïde chaud, 1 hexapole en aimant permanent) et compacte qui tente de reproduire les performances d'une source totalement supraconductrice pour un coût beaucoup plus modeste. Le financement d'A-PHOENIX fut long et compliqué. Afin d'en minimiser le prix, des choix technologiques risqués ont été nécessaires pour mener à terme la construction de cette nouvelle source. Le premier plasma d'A-PHOENIX a été réalisé en Août 2007. L'activité de R&D se fait à temps partiel depuis cette date, avec un arrêt d'un an pour construire la LBE qui se trouve dans la même casemate. Le point de fonctionnement attendu de la source chauffée à la fréquence de 18 GHz, est la production d'1 mA d'Argon  $8^+$  à minima. Les premiers tests réalisés fin 2007 et début 2008 ont révélé un problème de couplage de la micro-onde avec la chambre à plasma. Des modifications ont été apportées au design mécanique et ont permis d'améliorer les performances de 300  $\mu\text{A}$  à 700  $\mu\text{A}$  d'Ar $^{8+}$ . En parallèle, dans la même période, un défaut d'interlock a débouché sur l'injection accidentelle de la puissance HF dans la cavité sans refroidissement. En conséquence, deux petits hexapoles en aimants permanents ont été sérieusement endommagés. Les expériences ont continué avec ces aimants démagnétisés dans l'attente de leur remplacement. Suite aux tests de la LBE, la source d'ions a été démontée et les petits hexapoles ont été réparés avec succès en juillet 2009. Les tests de R&D ont repris et une modification mécanique de l'injection HF est en cours d'étude. Les premiers tests sont encourageants car, pour la première fois, des ions fortement chargés ont été produits (Argon  $16^+$ ). Des nouvelles modifications sont planifiées pour améliorer encore les performances. Dès que les résultats seront satisfaisants à 18 GHz, les tests continueront à la fréquence de 28 GHz à l'aide de chambres à plasma spéciales munies d'inserts en fer permettant d'augmenter le confinement magnétique jusqu'à le rendre comparable à une source d'ions totalement supraconductrice. L'objectif est de tenter de valider la source afin de l'utiliser directement comme 1<sup>ère</sup> source d'ions de SPIRAL2, afin d'offrir à la communauté S<sup>3</sup> des expériences intéressantes dès la deuxième année de faisceau.

Récemment, le projet SPIRAL2 a débloqué les fonds nécessaires à la construction d'une nouvelle source d'ions  $Q/A=1/3$  totalement supraconductrice. Le LPSC assurera le suivi de construction et les tests de cette source d'ions qui remplacera à terme la source de démarrage du LPSC sur SPIRAL2.

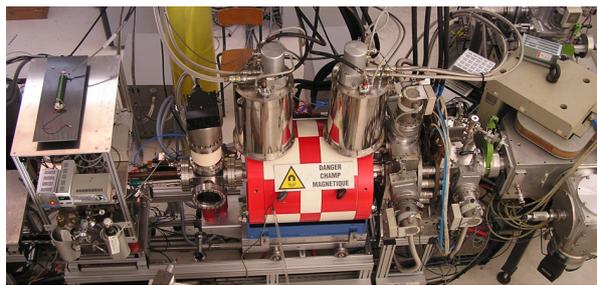


Fig. 5: Source d'ions A-PHOENIX.

### Pour en savoir plus

- European research activities on charge state breeding related to radioactive ion beam facilities (invited), T. Lamy, J. Angot and T. Thuillier, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A909 (2008)
- Last SPIRAL2 10 kW CW RF coupler design, Y. Gómez et al. [http://hal.in2p3.fr/in2p3-00327413\\_v1/](http://hal.in2p3.fr/in2p3-00327413_v1/) (2008)
- First plasma of the A-PHOENIX electron cyclotron resonance ion source, T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse and J. Angot, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A330 (2008)

## GENEPI-3C: un accélérateur pour GUINEVERE

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

A. Billebaud, Groupe Physique des Réacteurs

C. Barruel, J. Bouvier, J.-L. Bouly, J.-P. Girard, S. Muggeo, J.-P. Scordilis, D. Tourrès, Service Électronique

D. Bondoux, Y. Carcagno, G. Damieux-Verdeau, J.-C. Malacour, D. Marchand, J. Menu, G. Michel, E. Perbet, N. Rico, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques

G. Dargaud, Service Informatique

M. Heusch, Service Détecteurs et Instrumentation

IPN Orsay, IPHC-DRS Strasbourg, LPC Caen, SCK-CEN (Belgique), CEA/DEN Cadarache

*The GUINEVERE project, part of FP6 IP-EUROTRANS aims at coupling a fast nuclear core at SCK-CEN Belgium to a versatile neutron source. The GENEPI-3C accelerator, developed by IN2P3, will provide the external neutron source. LPSC, in charge of the machine, has led a collaboration with IPNO, LPC Caen and IPHC-DRS Strasbourg, to design and build the accelerator. The machine was assembled and commissioned at LPSC before its transfer to Belgium in the Fall 2009.*

Le LPSC travaille sur la thématique des réacteurs pilotés par accélérateurs ou Accelerator Driven System (ADS), destinés à l'incinération des actinides mineurs. Le programme GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VENUS REactor) fournira un instrument dédié aux études de faisabilité d'un système ADS. Il fait partie de l'activité intégrée IP-EUROTRANS dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRDT. GUINEVERE est basé sur le couplage du réacteur nucléaire VENUS du SCK-CEN (Mol, Belgique), modifié en réacteur rapide, avec une source externe de neutrons fournie par l'accélérateur GENEPI-3C. Pour développer cette nouvelle machine, une collaboration a été initiée avec trois laboratoires de l'IN2P3 : le LPC Caen, l'IPN Orsay, et l'IPHC-DRS Strasbourg.

### GENEPI-3C

GENEPI (GÉNérateur de NEutrons Pulsé Intense)-3C est un accélérateur électrostatique de deutons produisant des neutrons par irradiation d'une cible de tritium. Les ions deutérium sont issus d'une source portée à la haute tension. Le faisceau ainsi produit est transporté tout d'abord horizontalement, dévié par un dipôle dans le plan vertical puis acheminé sur la cible localisée au centre du cœur. Le Service Accélérateurs a eu la charge de conduire la conception, le développement et la construction de l'accélérateur. Ce générateur s'est appuyé sur l'expérience acquise et certaines technologies développées par le service à la fin des années 90 pour la réalisation des deux accélérateurs de type GENEPI dédiés aux programmes de Physique des Réacteurs. En outre, d'importants développements ont été nécessaires car cette troisième machine doit satisfaire de nouvelles contraintes : un fonctionnement en mode continu (dans lequel seront pratiquées des interruptions brèves), un couplage au réacteur dans le plan vertical et enfin certaines sections de la machine doivent être mobiles pour permettre les changements de cible et l'accès au réacteur.

La source, de type duoplasmatron, est bien adaptée au mode de fonctionnement pulsé. Afin d'étudier son fonctionnement continu, un banc de test spécifique a été mis en place au laboratoire. Il a permis d'extraire des faisceaux continus intenses, de générer des interruptions de faisceau rapides (quelques  $\mu$ s) requises pour le programme expérimental de GUINEVERE et d'optimiser l'efficacité d'ionisation en mode continu. Le transport de faisceau a été étudié pour établir la définition des lignes de faisceau. L'aimant de déviation, conçu par l'IPNO, a été fabriqué. Le LPC Caen a défini et réalisé un système de levage, guidage et positionnement de la ligne verticale de faisceau. L'IPHC-DRS a effectué les calculs de dimensionnement du vide, la conception et la fabrication du doigt de gant supportant la cible ainsi que son système de refroidissement et le guidage du dipôle qui sera escamoté dans le plan horizontal. Un nouveau type de diagnostic de faisceau, très compact, permettant la caractérisation du faisceau a été développé. Le LPSC a assuré la définition, la réalisation et l'intégration de tous les autres éléments de l'accélérateur.



Fig. 1 : L'accélérateur GENEPI-3C assemblé au LPSC.

Une aire expérimentale a été aménagée au LPSC afin de reproduire la configuration du réacteur VENUS. Le montage a débuté en avril 2008. L'accélérateur a

été assemblé et testé en plusieurs tronçons, les premiers faisceaux ont été produits en Décembre 2008. Le fonctionnement de la machine a été intégralement validé au LPSC : fonctionnement et pilotage des équipements, transport et caractérisation des faisceaux pulsés intenses et continus, refroidissement de la cible, mouvement des sections mobiles. La machine a été démontée, puis transférée en Belgique pour y être réassemblée. Les premiers tests de la source ont été réalisés sur le site de Mol fin 2009, les premiers faisceaux sont prévus pour le printemps 2010.

## Réalisations

La conception mécanique de la source et de la ligne de transport de l'accélérateur (à l'exception de la chambre d'aimant réalisée par l'IPNO et du doigt de gant conçu par l'IPHC) a été réalisée par le SERM du laboratoire. L'accélérateur GENEPI-3C est une ligne de faisceau beaucoup plus longue que celles des précédentes machines GENEPI-1 et 2 : l'optique de cette ligne comprend douze quadripôles électrostatiques. Ces pièces ont été réalisées par l'atelier du laboratoire, de même que la nouvelle source duoplasmatron et son optique de sortie (Fig. 2).



Fig. 2 : Quadripôles électrostatiques (réalisation SERM).

Le système de contrôle & commande de l'accélérateur a été entièrement renouvelé afin de s'appuyer sur des technologies plus récentes, près de 10 ans le séparant de la conception du premier opus. Ainsi chaque système électronique de commande et de mesure des équipements de la machine (pompage, mesures de vide, alimentations quadripôles...) est contrôlé par une carte développée par le Service Électronique, celle-ci s'auto-configurant en fonction de l'élément dans lequel elle se trouve. Cette carte, intégrant un noyau LINUX, est commandée à distance, à travers une liaison Ethernet à 100 Mb, par un PC, celui-ci gérant toutes les cartes (19) et l'interface homme/machine (réalisation du Service Informatique). Des développements spéciaux, à base de circuits à vote majoritaire, ont été effectués pour gérer les sécurités haute tension/vide.

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.

Toutes les équipes techniques engagées ont pris part à l'intégration et la mise en œuvre de la machine au LPSC, puis sur le site de Mol. L'installation et la mise en œuvre de GENEPI-3C au LPSC s'est également appuyée sur les Services Généraux et Sécurité-Radioprotection du laboratoire.

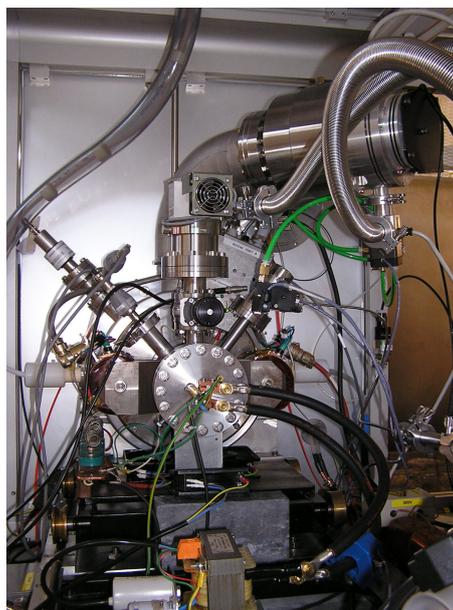


Fig. 3 : Source d'ions de type duo plasmatron (réalisation mécanique par le SERM).

### Pour en savoir plus

- The GENEPI-3C Accelerator for the GUINEVERE Project, M. Baylac et al, Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators (AccApp '09), May 4-8, 2009, Vienne (Autriche).

# Prototype de source d'ions ECR à 60 GHz

T. Lamy, L. Latrasse, M. Marie-Jeanne, P. Sortais, T. Thuillier

B. Boutherin, C. Gondrand, P. Meyrand, Service Informatique

C. Fourel, J. Giraud, G. Calogero, Service Études et Réalisations Mécaniques

Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses CNRS-INP, Institute of Applied Physics (Nizhniy Novgorod, Russie)

*In classical Electron Cyclotron Resonance Ions Sources, the plasma density (thus the intensity available at the extraction) varies as the square of the microwave frequency. In order to accept very high frequencies, it is necessary to develop high magnetic fields with complex topologies. A long term R&D program has been initiated in order to design and build 60 GHz ECR ion source prototypes, first dedicated to pulsed radioactive ion beams with high efficiency for the Beta Beam project (EURONu), then in the future, c.w. beams for 'classical' accelerators.*

## Collaboration LPSC-LNCMI

La densité des plasmas des sources ECR en configuration de Minimum-B est proportionnelle au carré de la fréquence de résonance cyclotronique électronique, ainsi l'augmentation de la fréquence de l'onde électromagnétique de chauffage induit une augmentation des courants pouvant être extraits de tels dispositifs. La fréquence la plus haute utilisée dans une source d'ions est actuellement 28 GHz, le LPSC s'est engagé dans un programme de développement d'un prototype à 60 GHz. L'obtention de hautes densités dans un volume restreint doit aussi permettre une bonne efficacité d'ionisation, ce qui est un point clef pour la réussite du projet Beta-Beam dédié à la production de faisceaux de neutrinos à partir de la désintégration  $\beta^-$  de faisceaux radioactifs accélérés.

Afin d'établir le champ magnétique permettant d'obtenir, dans le plus petit volume possible ( $\Phi = 60$  mm,  $l = 100$  mm), une zone de résonance fermée à 60 GHz (2,14 T), un confinement axial de 6 T à l'injection, de 3 T à l'extraction, ainsi qu'un confinement radial de 4 T dans une configuration de CUSP (champ nul au centre), la technologie Polyhéliques du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) a été retenue. La collaboration entre les deux laboratoires a été très fructueuse et a permis de valider des techniques de simulations et de repousser les limites de la technologie déjà bien éprouvée par le LNCMI. Les résultats de la simulation vont au-delà des valeurs attendues (Fig. 1 gauche) et ont été validés par une mesure bas courant sur un prototype en aluminium. Le prototype lui-même (Fig. 1 droite) est en cours de fabrication.

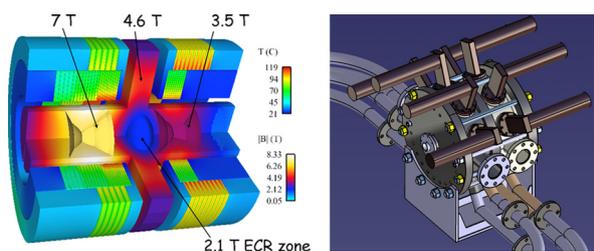


Fig. 1 : Simulation du champ magnétique du prototype et maquette CAO de l'ensemble de la source. Les cylindres en haut sont les amenées de courant, les tuyaux du bas servent au refroidissement à l'eau du prototype.

Une demande de champ a été faite auprès d'Euromagnet II et a été acceptée (rang A, 15 jours), le site de mesure est en cours d'installation (Fig. 2) les mesures de champ magnétique seront effectuées début 2010 à mi-courant ce qui validera définitivement le prototype, il pourra ainsi être qualifié en tant que source d'ions à 28 GHz.

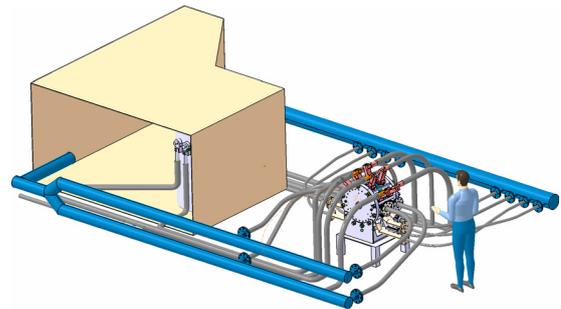


Fig. 2 : Schéma d'installation du prototype de source 60 GHz pour la mesure de champ sur le site M5 du LNCMI.

Pour le futur, une collaboration scientifique a été développée entre l'Institute of Applied Physics de Nizhniy Novgorod (Russie), le LPSC, le LNCMI, le CERN et l'Institut de Physique des plasmas (EURATOM) de Milan avec une demande de soutien financier auprès de l'International Science and Technology Center. Ce projet a été accepté, il permettra la fabrication d'un gyrotron (60 GHz, >100 kW) et l'étude des faisceaux extraits de la source ECR fonctionnant à cette haute fréquence. Le financement est partagé entre l'ISTC (491 k€) et le LPSC-CNRS (225 k€).

## Activités de R&D

M. Baylac, J.-M. De Conto, E. Froidefond, Y. Gómez-Martínez, J. Fourrier, M.-L. Lombard, F. Méot, R. Micoud. CEA/IRFU

Within the framework of FP6 and FP7, accelerator R&D programs are carried out. They include beam dynamic studies as well as radiofrequency (RF) developments.

### Coordinated Accelerator Research in Europe (CARE)

CARE est un programme financé par le 6<sup>e</sup> PCRDT (FP6) portant sur les R&D accélérateurs en Europe, qui s'est achevé en 2008. Le LPSC a été impliqué dans deux activités : HIPPI et BENE.

HIPPI (High Intensity Pulsed Proton Injectors) est une « Joint Research Activity » et a porté sur l'ensemble des techniques requises pour le développement d'accélérateurs linéaires de puissance pulsés. Le laboratoire s'est investi dans deux lots de travaux :

- Le lot « WP2 », portant sur les techniques radiofréquences non supraconductrices : une personne du LPSC a assuré la coordination des activités de ce lot qui rassemblait plusieurs laboratoires européens. Par ailleurs, le laboratoire a réalisé un coupleur de puissance (1 MW) pour le futur injecteur du LHC, LINAC4, en collaboration avec le CEA et le CERN. L'essentiel de l'activité a porté sur l'étude de cavités à couplage latéral, avec la réalisation d'un module prototype de 11 cellules. Associées aux programmes de caractérisation et de mesure de ce prototype, des procédures de réglages fins ont été proposées.
- Le lot « WP5 », portant sur la dynamique faisceau : le laboratoire s'est associé au CERN pour la conception générale de LINAC4. En particulier, de nombreuses simulations ont été effectuées pour étudier la robustesse de la structure. Ces études d'erreurs ont permis de définir les tolérances de la machine, qu'elles soient mécaniques ou RF (stabilité des klystrons par exemple).

BENE est une « Networking Activity » de CARE, dont une personne du LPSC a coordonné le « Work Package » WP5 « Muon End » : collecte, accélération et stockage des muons. L'année 2008 permis de finaliser l'organisation de la nouvelle collaboration EUCARD dans FP7. Les travaux dans le cadre de BENE ont porté sur les points suivants :

- contribution au rapport final de la collaboration (en matière d'études de design des accélérateurs de muons, de l'anneau de stockage des muons);
- contribution au rapport final de la collaboration ISS-NuFact: "Accelerator design concept for future neutrino facilities, RAL-TR-2007-23", publié dans JINST (2009);
- études de dynamique faisceau concernant le projet EMMA;

- développement de codes de calcul pour ces applications, comme par exemple pour la décroissance des muons dans l'anneau de stockage;
- contribution au montage du WP « EUROFFAG » dans EUCARD.

### EMMA

EMMA est une collaboration internationale BNL, CERN, FNAL, LPSC, TRIUMF et STFC (UK). Cet "Electron Model of a Muon Accelerator" est une maquette des accélérateurs circulaires à champ fixe pour les muons dans l'usine à neutrinos. La méthode d'accélération est basée sur deux concepts nouveaux, de dynamique transverse et d'accélération, le but d'EMMA étant d'établir une preuve de principe de ces concepts. Le projet de maquette a été lancé en 2001 aux États-Unis et a trouvé financement en Angleterre en 2006 dans le cadre du consortium BASROC ("British Accelerator Science and Radiation Oncology Consortium"). Le projet court sur 2007-2010 (3,5 années); le premier faisceau est prévu pour novembre 2009, dans les temps à 3 mois près. Nous intervenons en études de dynamique d'une part : accompagnement du design de la maille optique, de l'accélération, de l'injection, et d'autre part en développement de codes de calcul et pour le commissioning de l'anneau.

### EURO-Nu

EURO-Nu est une « Design Study » européenne (FP7, 2008-2012) qui s'intéresse à la production de faisceaux de neutrinos intenses. La collaboration EURO-Nu est scindée en trois groupes : super-beam (neutrinos de muons issus de pions issus de protons sur cible, classe mégawatt), beta-beam (neutrinos de faisceaux radioactifs accélérés) et « Usine à neutrinos » (ou « NuFact ») (neutrinos de muons accélérés). Chacun de ces groupes est une collaboration inter-laboratoires, et a pour tâche un certain nombre d'études relatives à la faisabilité de l'installation et à son coût. En matière de synthèse, EURO-Nu comprend la comparaison des trois méthodes et leur capacité à donner accès aux paramètres de mélange et de violation de CP.

Nous intervenons dans NuFact, qui est sur le plan pratique une collaboration directe à la collaboration mondiale (design study) IDS-Nufact, elle-même suite de l'International Scoping Study ISS-NuFact.

## EUCARD

EUCARD est un programme européen financé par le 7<sup>e</sup> programme cadre FP7. Le LPSC s'y est naturellement engagé à la suite de CARE.

Le lot de travaux « WP4 » ou « ACCNET » a pour mission de fédérer, par des activités de réseau, les R&D accélérateurs autour des grandes installations existantes (LHC, FAIR, PSI, etc.) ou futures (ILC ou CLIC). Le LPSC s'est ainsi engagé dans la tâche EUROLUMI (dont l'objectif est l'augmentation de la luminosité) et dans la tâche RFTECH, qu'il coordonne et dont l'objectif est le développement de l'ensemble des techniques radiofréquences (aspects cavités mais aussi électronique « bas niveau », par exemple).

Le WP ANAC s'intéresse quant à lui aux méthodes nouvelles d'accélération. EUROFFAG porte sur la méthode particulière des « synchrotrons à champ fixe » telle que préconisée pour l'accélération rapide des muons dans l'usine à neutrinos. Plus particulièrement, EUROFFAG se focalise sur le financement de la ligne de diagnostics à haute énergie d'EMMA, et la participation aux expériences machine *ad hoc*. Il s'agit en quelque sorte d'assurer une seconde phase dans le projet EMMA, avec tout d'abord la préparation puis la mise en œuvre de ces diagnostics, de la ligne de faisceau et des mesures.

