

Pôle Accélérateurs et Sources d'ions

Le pôle Accélérateurs et Sources d'ions travaille à la conception et à la réalisation d'accélérateurs et de sources d'ions pour les programmes de physique et les applications industrielles. Le pôle est ainsi impliqué dans des thématiques scientifiques extrêmement variées comme la physique nucléaire (neutronique, physique des réacteurs, ions radioactifs) et la physique des particules. Les compétences mises en œuvre portent sur la physique générale des accélérateurs et des sources, la radiofréquence, le magnétisme, la valorisation et la formation technique et doctorale.

La ligne basse énergie du projet SPIRAL2 a été caractérisée au laboratoire avant d'être réinstallée au GANIL. La source d'ions lourds à $Q/A=1/3$ a été améliorée et optimisée, pour une livraison prévue en mai 2014. Une nouvelle version de cette source est à l'étude, qui permettra de délivrer des faisceaux plus intenses. Le booster de charge ainsi que la ligne d'analyse en ions exotiques multichargés ont fait l'objet de développements techniques (commande/contrôle et nucléarisation du booster, définition détaillée de la ligne). Toujours dans le cadre de SPIRAL2, les coupleurs radiofréquence dédiés au Linac ont fait l'objet d'améliorations importantes du processus de fabrication et de conditionnement, et la production, tout à fait satisfaisante, arrive à son terme.

Le générateur de neutrons GENEPI2 est exploité pour l'étude de défaillance de circuits intégrés. Une jouvence est à l'étude pour permettre, à court terme, de disposer d'une plateforme d'irradiation neutrons multi-usages à plus grand flux.

L'accélérateur GENEPI3C est utilisé pour le pilotage d'un réacteur sous-critique par un accélérateur à MoI (Belgique). Le couplage a été effectif fin 2011. Il permet de mener le programme de physique côté réacteur mais également d'acquérir une réelle expérience de type d'installation, en termes techniques et humains.

Les sources d'ions font l'objet de R&D poussée. Une source ECR à 60 GHz est ainsi à l'étude en collaboration avec le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, et des premiers faisceaux ont été extraits à 18 GHz. Par ailleurs, une collaboration (EMILIE) est menée. Elle porte sur l'étude des mécanismes entrant en jeu dans les booster de charge utilisant des faisceaux alcalins.

La R&D accélérateur porte notamment sur la ligne basse énergie du projet d'ADS MYRRHA. Cette ligne est en cours de conception et permettra l'étude des faisceaux intenses de basse énergie (neutralisation, diffusion par exemple).

Diverses activités sont arrivées à leur terme : la réalisation des nappes polaires pour le CERN-PS, les études de transport de spin dédiées à SUPERB, les activités de réseaux européens dans le domaine des radiofréquences (dont le pôle assurait la coordination).

Enfin, le pôle dispose de locaux blindés et accueille une société industrielle pour le test d'accélérateurs d'électrons.

Le pôle est fortement impliqué dans des projets locaux. Il répond par ailleurs aux demandes exprimées par la communauté de physique, tant par les programmes nationaux qu'internationaux. Il mène une politique active de recherche de nouveaux projets et de mise en œuvre de collaborations

Projet SPIRAL2

*T. Lamy, J. Angot, M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, Y. Gómez Martínez, J. Jacob, M. Marie-Jeanne, R. Micoud, P. Sole, T. Thuillier, J.-L. Vieux-Rochaz
P. De Lamberterie, Chargé de mission qualité
D. Grondin, D. Bondoux, D. Fombaron, C. Fourel, G. Freche, C. Geraci, J. Giraud, M. Legrand, J.-C. Malcour, S. Roni, S. Roudier, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques
R. Faure, M. Marton, O. Zimmerman, Service Détecteurs et Instrumentation
C. Deslorieux, F. Petiot, Service Administration
W. Regairaz, Service Sécurité
P. Meyrand, Service Informatique
C. Peauccelle, Institut de Physique Nucléaire de Lyon
C. Barué, C. Canet, M. Dubois, M. Dupuis, J.-L. Flambard, R. Frigot, P. Jardin, F. Lemagnen, L. Maunoury, B. Osmond, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds*

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.

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

Ligne basse énergie

La ligne Basse énergie ions lourds $Q/A=1/3$ a été caractérisée au LPSC en collaboration avec les concepteurs et constructeurs des différents sous-ensembles. Les caractérisations de la ligne et de la source d'ions PHOENIX V2 se sont poursuivies jusqu'au mois de mai 2012 en collaboration LPSC-IPNL-GANIL avec une participation régulière des personnels du groupe sources du GANIL aux campagnes de mesures.

Le Service Détecteurs Instrumentation (SDI) a poursuivi le développement du logiciel LabVIEW de pilotage de la source et de la ligne, assurant notamment l'automatisation des mesures de spectres (application synchrone des profils de champ des aimants de la ligne de faisceau et acquisition des mesures), la visualisation en ligne ou a posteriori des paramètres de la ligne, le réglage fin des différents appareils. Un module d'interface LabVIEW-EPICS a été mis en place dans l'application LabVIEW. Le rôle de cette « passerelle » est de permettre au logiciel de supervision EPICS de piloter à travers l'application LabVIEW une série de commandes et de mesures gérées par cette dernière. L'applicatif EPICS de haut niveau a pu ainsi piloter l'ensemble de la ligne avant même de disposer de tous ses composants bas-niveau. La passerelle LabVIEW-EPICS a permis de mener en parallèle les optimisations de la source et de la ligne, avec LabVIEW, et le développement de la supervision EPICS nominale.

L'objectif principal des études expérimentales a été l'optimisation des faisceaux de nickel dont la vapeur était produite par un four de grande capacité du GANIL, la figure 1 montre un spectre typique de Nickel obtenu au LPSC.

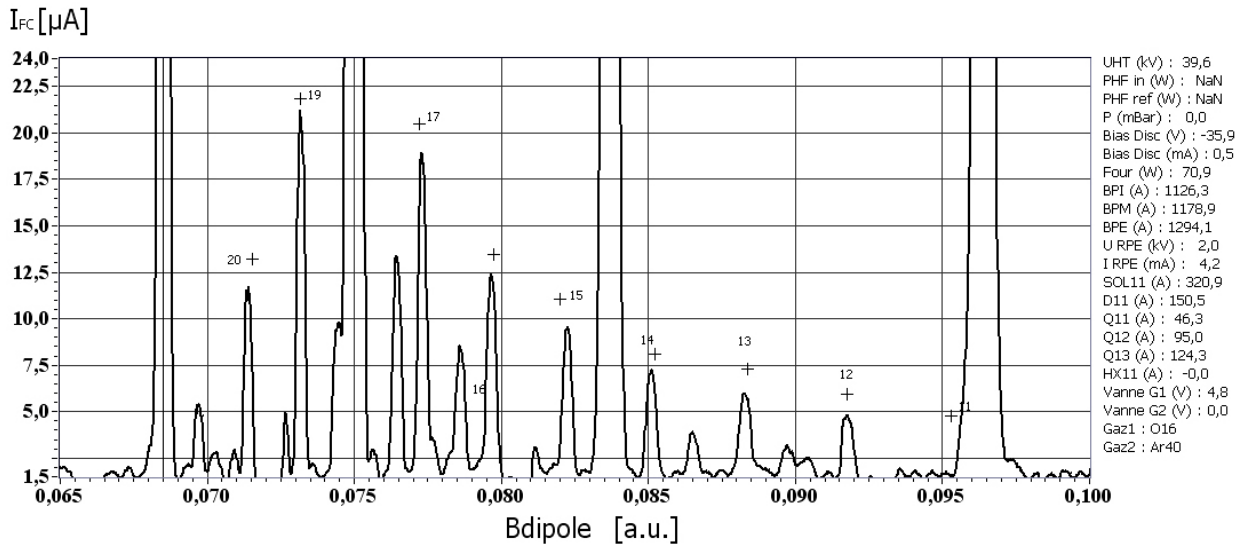


Fig. 1 : Spectre d'ions multichargés de nickel extrait de la source PHOENIX V2 et analysé dans la ligne basse énergie de SPIRAL2 au LPSC.

Au mois de juillet 2012 la ligne basse énergie a été démontée et expédiée au GANIL en vue de son installation dans le bâtiment accélérateur de SPIRAL2. La source d'ions PHOENIX-V2 a été installée sur une autre ligne de faisceau du LPSC, ce qui a nécessité des adaptations mécaniques effectuées par le Service d'Etudes et de Réalisations mécaniques (SERM) et des modifications du contrôle commande effectuées par le SDI pour prendre en compte le nouvel environnement. Enfin, le LPSC a participé au montage de la ligne et des boîtes à vide en octobre 2013, les châssis et les éléments d'optique ayant déjà été installés.

Source d'ions lourds (Q/A=1/3)

PHOENIX-V2

De nombreuses améliorations techniques ont été effectuées sur la source PHOENIX V2 et son environnement. Le SERM a accompagné les études expérimentales en assurant la conception et la réalisation de différents sous-ensembles complexes tels que les chambres à plasma ainsi que le système d'extraction de la source. La baie haute tension supportant les servitudes de la source (les gaz et ses vannes de dosage, le four pour la production de vapeur métallique, le guide d'onde HF, l'alimentation du disque polarisé) a été validée à 62 kV ce qui fait de cette source, la seule au monde à pouvoir produire des faisceaux accélérés à $60 \cdot q$ keV (en général les sources fonctionnent à 20-25 kV) sans pour autant nécessiter l'utilisation d'une plateforme haute tension supportant l'ensemble des alimentations (bobines, émetteur HF) représentant une puissance de l'ordre de 200 kW. L'extraction à double électrode a été optimisée afin de produire des faisceaux de bonnes qualités optiques tout en gardant une excellente transmission de la ligne de faisceau (> 90%).

Une faiblesse magnétique au niveau de l'hexapôle a nécessité son démontage. En général, dans cette situation il convient de changer les aimants altérés ce qui implique des délais très importants. La proximité du Laboratoire National des Champs Magnétiques intenses nous a permis, suite à la conception et à la réalisation d'outillages dédiés, la ré-aimantation des aimants permanents défectueux ce qui représente une économie extrêmement importante en temps et en coût.

Une nouvelle chambre à plasma optimisant le refroidissement des aimants a été installée puis une série d'expériences a été effectuée pour optimiser la production des faisceaux de calcium (étude de l'influence de la nature du gaz support, utilisation d'une double paroi en tantale, réalisée au GANIL, installée dans la chambre et chauffée par le plasma pour augmenter le recyclage), un spectre est donné pour exemple figure 2. Enfin le DC-breaker (dispositif permettant de transporter les ondes HF guidées et référencées au potentiel terrestre jusqu'à l'intérieur de la source référencé à 60 kV), présentant des problèmes de tenue dans le temps à la haute tension (passage de 2 kW de HF au travers d'une feuille de téflon de surface inférieure au cm^2), a été réétudié en vue du remplacement de la feuille de téflon par une lame de quartz (voir figure). Ce nouveau dispositif a donné entière satisfaction est a été installé sur la source de démarrage de SPIRAL2 PHOENIX V2 qui sera livrée au GANIL en mai 2014.

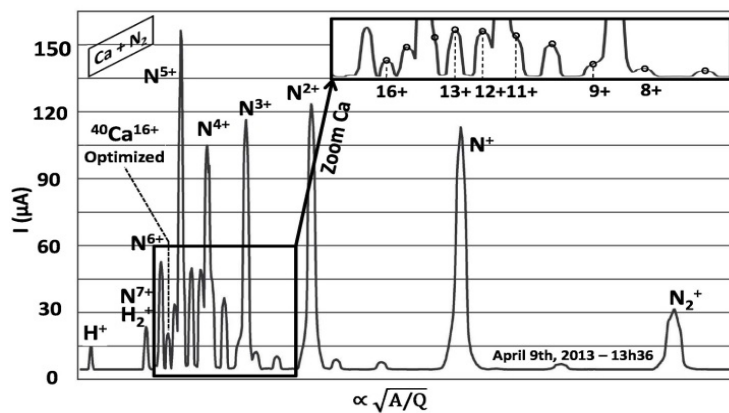


Fig. 2 : Spectre d'ions multichargés de calcium extrait de la source PHOENIX V2 et analysé dans la ligne basse énergie de SPIRAL2 au LPSC.

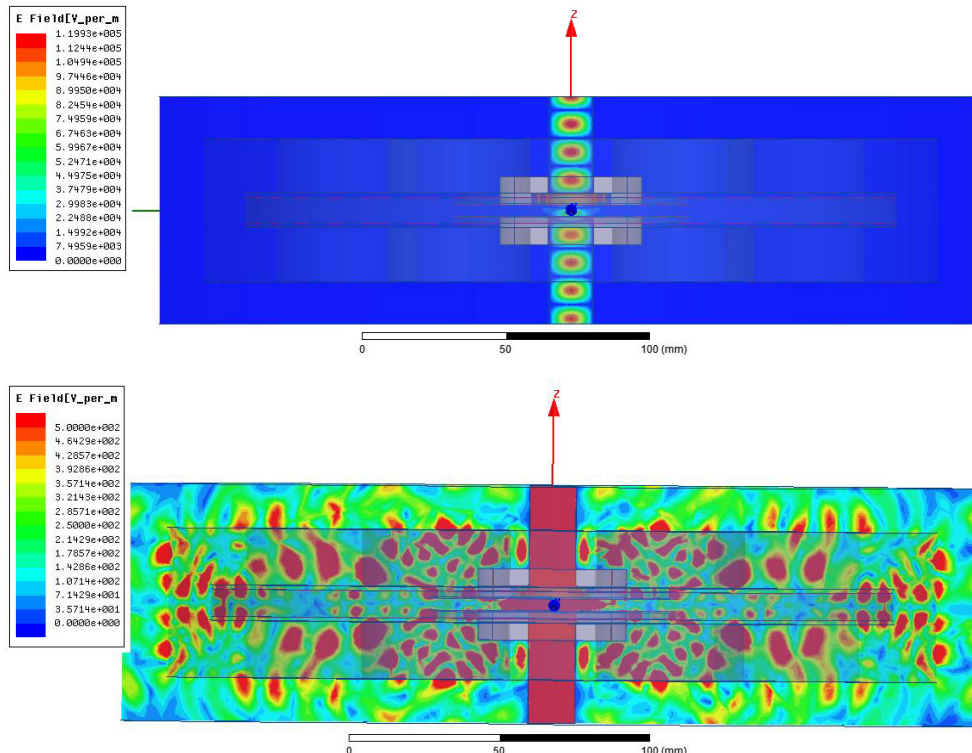


Fig. 3 : Simulation HFSS de la transmission des ondes hyperfréquences à travers le DC-breaker quartz (haut) et du champ électrique dans la structure mécanique isolante (bas).

PHOENIX-V3

La technologie PHOENIX présente un grand avantage par rapport à la plupart des sources existantes, elle est constituée d'une structure externe (référéncée à la terre) composée des bobines de champ axial et d'anneaux en fer doux permettant d'optimiser celui-ci, et d'un noyau central (porté à la HT) comprenant essentiellement la chambre à plasma, l'hexapôle établissant le champ radial ainsi que deux pièces massives en fer doux concentrant et renforçant le champ axial sur l'axe en extrémité d'hexapôle. Cette géométrie permet de modifier les caractéristiques de la source sans pour autant modifier la structure externe, il a ainsi été décidé, afin de gagner en performances en terme d'intensités d'ions lourds multichargés $Q/A=1/3$, d'augmenter le volume du plasma tout en maintenant les caractéristiques magnétiques constantes. Le noyau central sera modifié afin de satisfaire ces critères. Un nouvel hexapôle de plus grand diamètre intérieur ainsi que des pièces en fer doux ont été conçus, l'ensemble de la source sera assemblé et les premiers tests de faisceaux sont prévus pour mai 2014. L'accélérateur SPIRAL2 pourra ainsi profiter de faisceaux plus intenses que ceux délivrés par la source actuelle PHOENIX-V2.

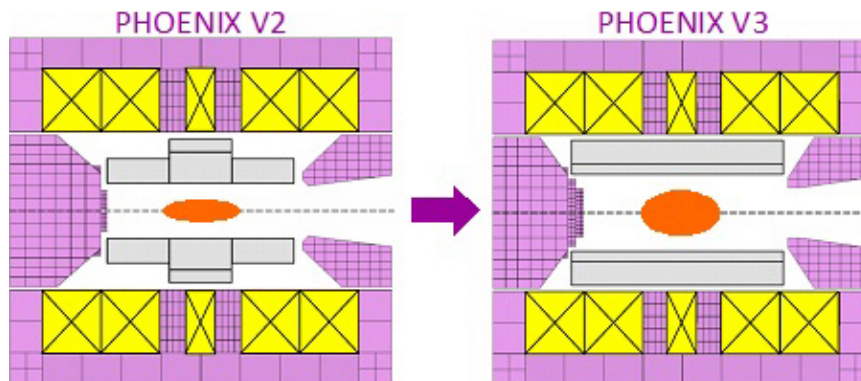


Fig. 4 : Coupe schématique comparative des sources PHOENIX-V2 et V3.

Booster de charge et Ligne verticale n+ analyse Booster

Booster de charge

Les activités pour le Booster de charge et la ligne n+ Analyse Booster de SPIRAL2 ont été essentiellement techniques.

Le SERM a assuré un travail très conséquent au niveau des études détaillées de la plupart des composants du booster de charge, les standards de mécanique du projet ont été intégrés, une vue d'ensemble de l'étude du booster est donnée figure 5. Ce service a mené une activité importante de calculs mécaniques (contraintes et déplacements des châssis supports du fait de la masse des éléments et lors des séismes ainsi que lors des manutentions, étude du comportement mécanique du caisson d'injection sous vide lors des séismes ainsi que de la résistance mécanique du circuit de refroidissement des bobines de champ axial), pour exemple on montre figures 6 et 7 les résultats des contraintes des châssis du booster ainsi que celles engendrées par la pression d'eau de refroidissement sous 15 bars dans la clarinette d'alimentation en eau de refroidissement.

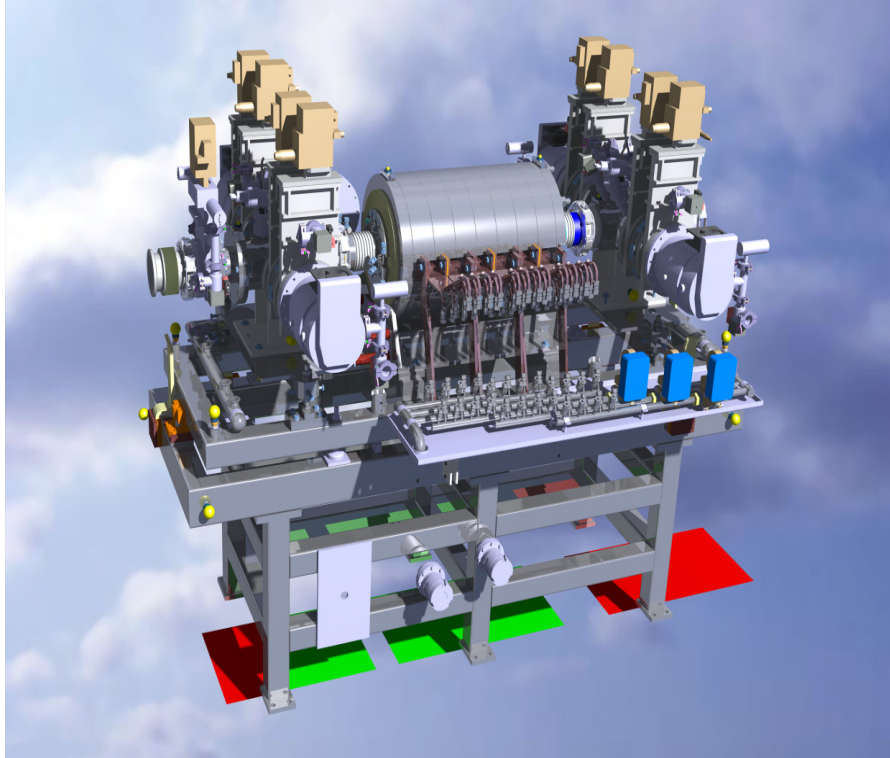


Fig. 5 : Vue d'ensemble de l'étude détaillée des différents composants du booster de charge pour SPIRAL2.

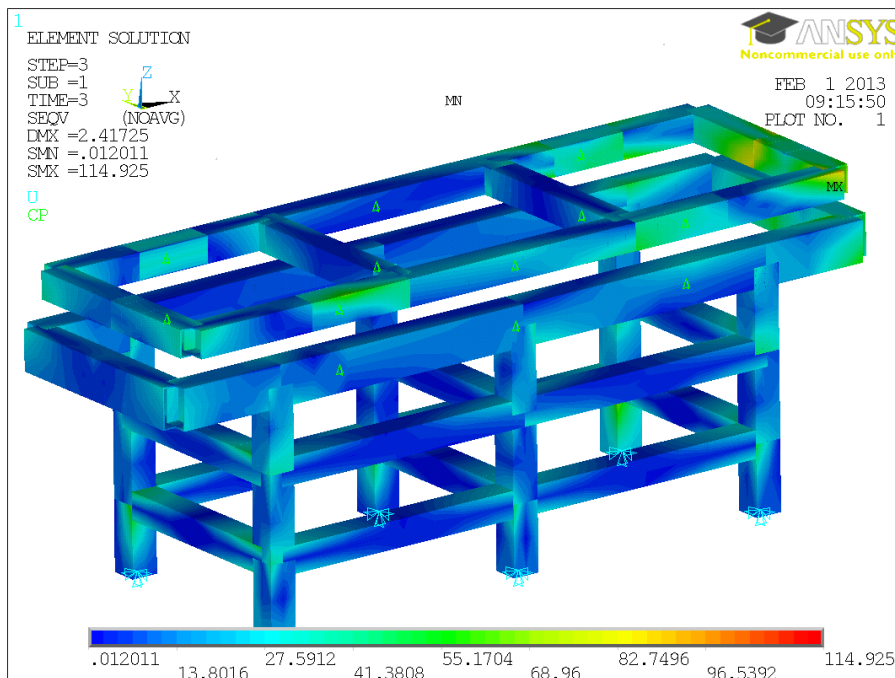


Fig. 6 : Contraintes de Von Mises pour le châssis du booster dans le cas poids et séisme (MPa).

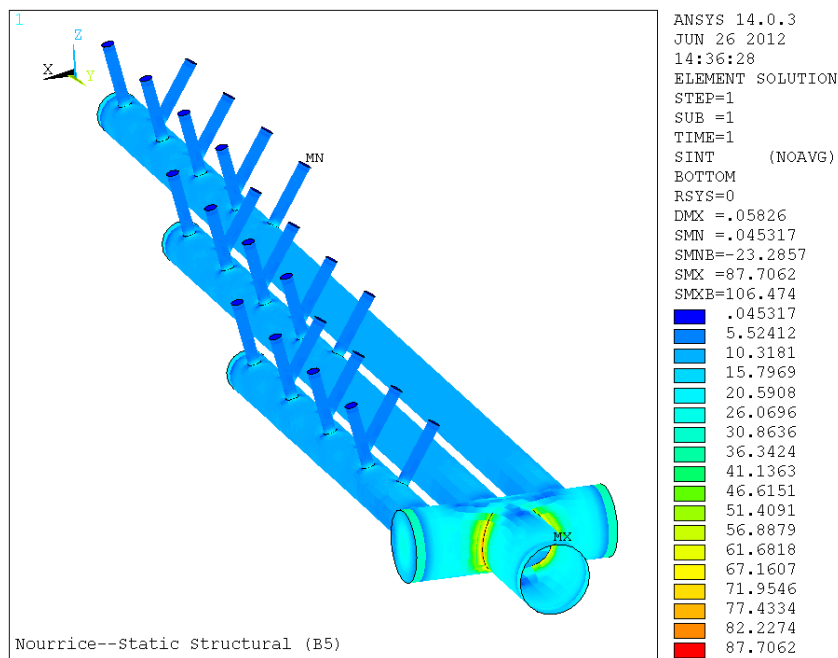


Fig. 7 : Système de refroidissement des bobines : contrainte en membrane plus flexion 88 MPa (critère : 259,5 MPa).

Pour les activités de contrôle commande, le SDI s'est positionné sur le développement sous EPICS. Dans cette perspective, de nombreux essais ont permis d'acquérir une meilleure connaissance de ce système, en particulier en validant l'échange de données d'instruments simulés via le protocole « channel access ». Le module de communication série « asyn » ainsi que la mise en place d'interfaces utilisateur graphiques sous « CSS-BOY » ont été testés avec succès. Un test de terrain sur un moteur pas à pas du prototype de booster de charge du LPSC a validé une chaîne de commande complète sous EPICS, ouvrant la voie à de premières applications de pilotages. Nous avons de même effectué l'analyse fonctionnelle du contrôle commande du booster.

Les activités de l'équipe sources d'ions ont porté sur la nucléarisation qui consiste en l'optimisation des principes de maintenance du système dans un environnement radioactif (zone jaune). Cette optimisation est obtenue grâce à l'analyse et à la simplification de tous les dispositifs mécaniques mis en œuvre lors des démontages pour maintenance. Cette étude a été étendue à l'étude des raccords des servitudes (amenée des courants intenses de 1300 A, refroidissements des bobines de confinement axial, injection de l'hyperfréquence).

Enfin, le vide résiduel ayant une grande influence sur les efficacités de multi-ioni- sation, les taux de dégazage des différents éléments ont été évalués à la fois au niveau théorique et à partir d'expérimentations.

Ligne n+ Analyse Booster

Cette ligne située en aval du booster de charge réalise l'analyse et la compensation du faisceau multichargé 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.

La définition détaillée de cette ligne a été effectuée par le SERM. Cette définition a porté principalement sur :

- La structure des modules constituant la ligne (définition et positionnement des équipements).
- L'architecture des supports des modules.
- Les dispositifs et procédures d'alignement des modules.
- La manutention des modules (scénarios et outillages nécessaires).
- Le cheminement des servitudes et tableaux de connexions associés.

Une première évaluation de la tenue au séisme des structures porteuses et dispositifs de fixation des modules a également été réalisée. Les figures 8 et 9 montrent les trois premiers modules ainsi qu'une vue d'ensemble de la ligne de faisceau.

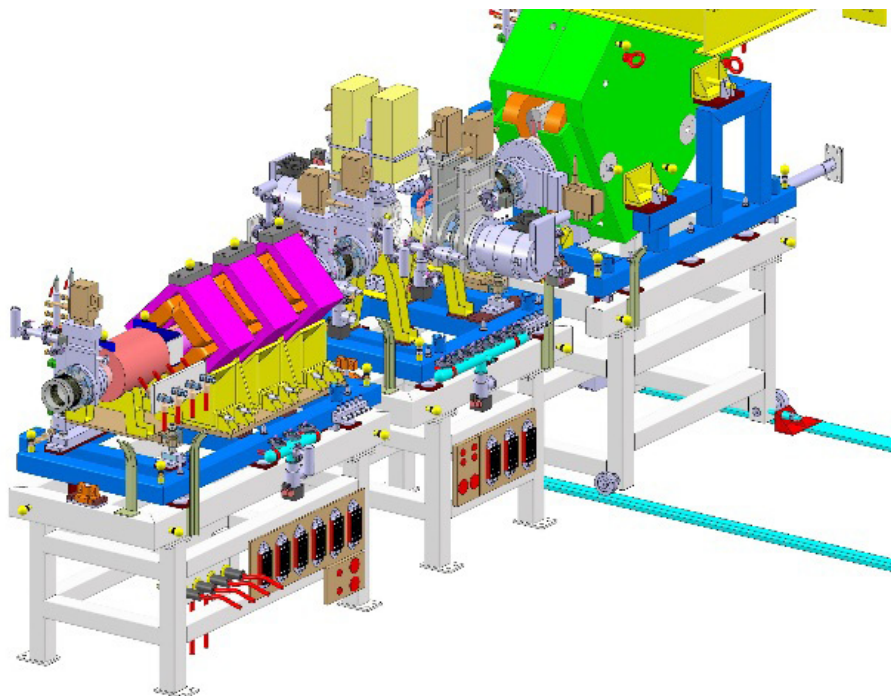


Fig. 8 : Les 3 premiers modules de la ligne.

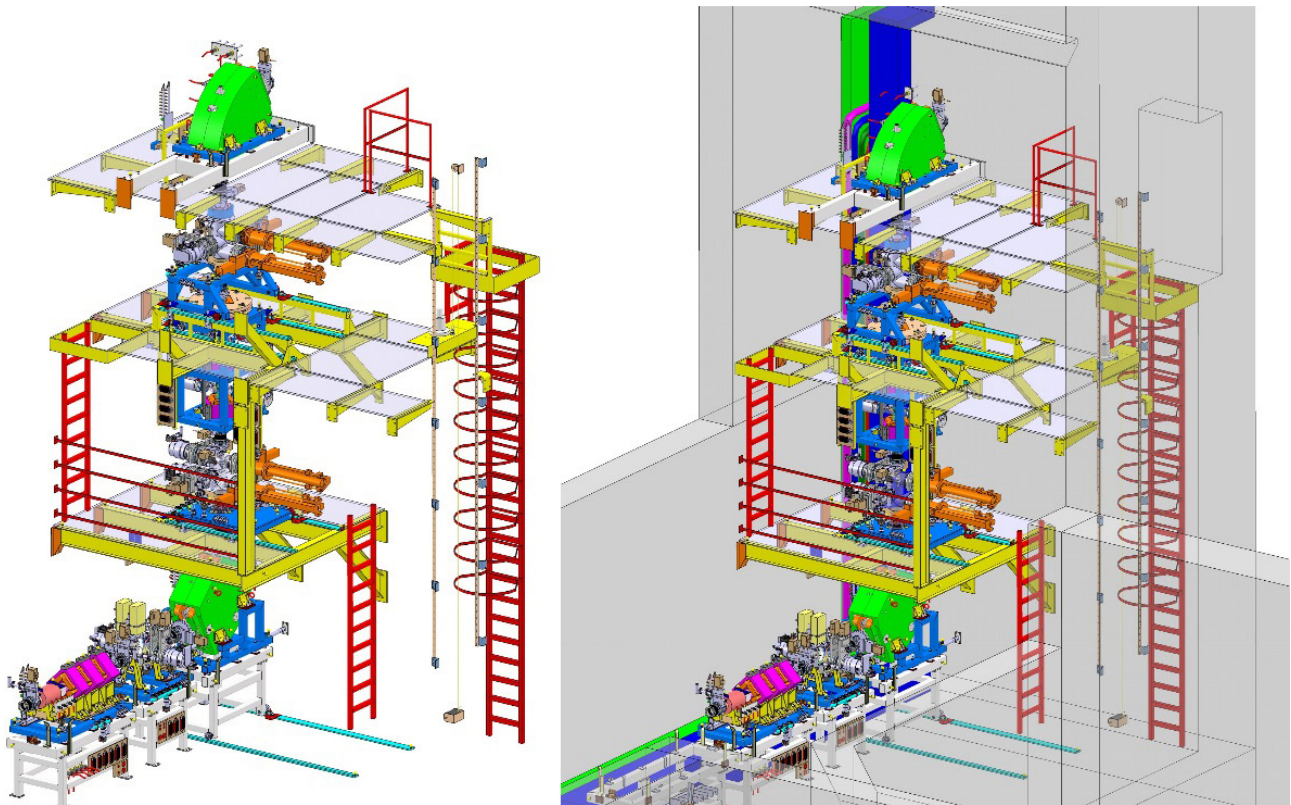


Fig. 9 : Ensemble ayant fait l'objet de l'étude détaillée (seul et dans le contexte du bâtiment).

Les coupleurs RF de puissance

Nous sommes en charge de la réception, de la préparation et du test des 28 coupleurs radiofréquence (RF) avec son système de compensation des misalignements, des efforts barométriques et thermiques. Les coupleurs ont pour but principal de transférer la puissance des amplificateurs RF (88,05 MHz, 20 kW CW) aux différents types de cavités accélératrices.

En 2011, trois cryomodules n'ont pas atteint les spécifications du champ accélérateur ($E_{acc_nominal} = 6,5 \text{ MV/m}$) à cause d'une forte émission de champ. En 2012, pour résoudre ce problème des contrôles de poussières ont été imposés pour tout élément monté dans le LINAC (ACcélérateur LINEar), dont le coupleur. Le contrôle consiste à souffler avec N₂ filtré à 5 bars, la mesure de particules doit donner que il n'a aucune particule plus grande que 5 μm et moins que 100 particules plus petits à 0,5 μm . Ne pas tenir cette spécifications provoque un nettoyage du matériel. Depuis que cette spécifications est tenu, tous les cryomodules ont atteint les 6,5 MV/m voir 9 MV/m de champ accélérateur.

Le bout de l'antenne du coupleur couplé avec la cavité peut être soumis à un champ électrique de 12 MV/m.

Ainsi en 2012-2013 un effort particulier a été réalisé concernant l'amélioration de la propreté du coupleur et l'état de surface de l'antenne :

- L'antenne est maintenant électropolée. L'électropolissage est réalisé par l'équipe du LPSC dans le bain électrolytique (phosphore et éthanol) du LNCMI (Laboratoires National du Champ Magnétique Intense).
- Tous les parties métalliques du coupleur et ses pièces annexes sont désoxydés

(10 minutes avec d'acide citrique puis l'antenne pendant 2 minutes avec de l'acide sulfamique).

- Les coupleurs sont contrôlés et assemblés sur une hotte ISO4 situé à l'intérieur de la salle propre ISO6.
- À chaque étape du montage du coupleur des contrôles de particules sont réalisés.

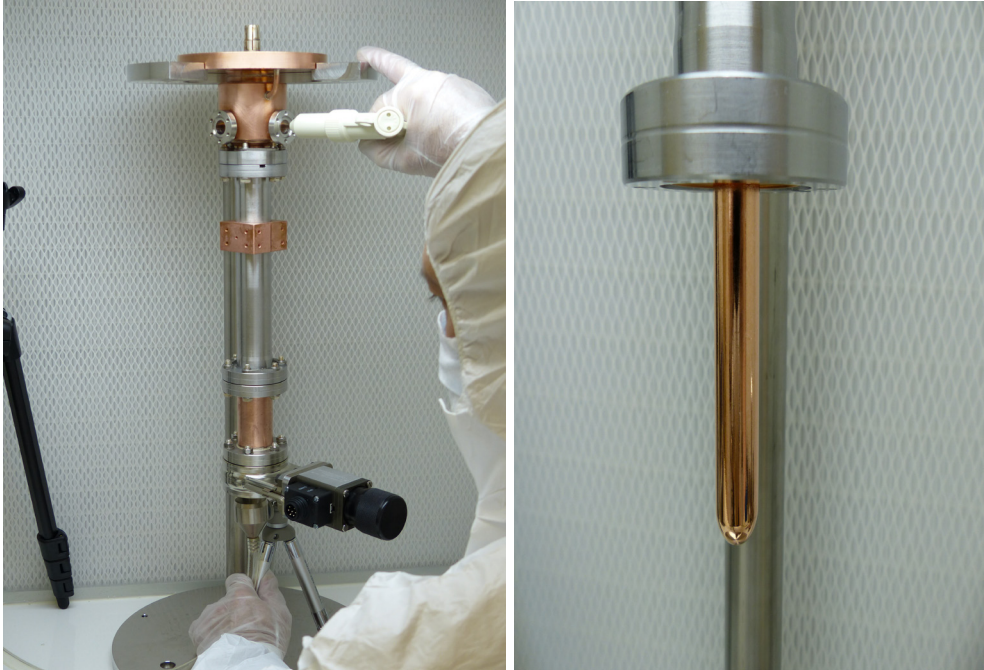


Figure 10 : Comptage de particules du coupleur (à gauche) et l'antenne électro-polie (à droite).

En 2012-2013, nous avons aussi optimisé le protocole de conditionnement RF et maintenant le temps est passé d'une moyenne de quelques jours à quelques heures. Le temps du traitement complet (contrôles, électropolissage, préparation, montage, tests RF, emballage) du coupleur est de 10 jours.

Aujourd'hui, ils restent à préparer et tester cinq des vingt-six coupleurs présent dans l'accélérateur plus les deux de rechange.

Pour en savoir plus

Power couplers for SPIRAL2, Y. Gómez Martínez et al. (SRF 2011).

Last Spiral2 coupleurs preparation and RF conditioning, Y. Gómez Martínez et al. (SRF 2013).

L'accélérateur GENEPI2

*M. Baylac, P. Boge, E. Labussière, D. Marchand, R. Micoud, S. Rey
T. Cabanel, Service Détecteurs et Instrumentation
J. Bouvier, D. Tourres, Service Électronique
G. Dargaud, Service Informatique*

The electrostatic accelerator GENEPI2 is under operation at LPSC to produce 2.5 or 14 MeV neutrons. It was used to run a new type of experiments dedicated to printed circuits irradiation.

The machine is currently going through a major upgrade to improve reliability and optimize the neutron flux.

En fonctionnement au LPSC depuis une dizaine d'années, GENEPI2 (GENérateur de NEutrons Pulsé Intense) produit des neutrons de 14 MeV (ou 2,5 MeV) par impact de faisceaux de deutons accélérés à 250 keV sur une cible de Tritium (ou Deutérium). Initialement, cet accélérateur a été développé et exploité pour les expériences en soutien des études des réacteurs nucléaires innovants dans le cadre de la plateforme PEREN.

Depuis 2013, cette infrastructure accueille un nouveau type d'expériences dédié aux études de sensibilité des circuits et systèmes intégrés issus de technologies sub-nanométriques au flux neutronique. La fiabilité des circuits intégrés en présence de particules énergétiques doit être caractérisée expérimentalement pour les applications spatiales et aussi pour certaines applications critiques opérant dans l'atmosphère terrestre. Pour cela, le circuit est exposé à des flux significatifs pendant qu'il exécute une tâche représentative de son fonctionnement nominal. Ces campagnes expérimentales sont menées en collaboration avec des collègues du laboratoire TIMA¹ et ont concerné plusieurs générations de mémoire d'un même constructeur. Elles seront étendues à d'autres types de mémoire et différents composants électroniques.

Programmé pour la fin de l'année 2013, l'arrêt de l'accélérateur est consacré à une jouvence et une extension de l'infrastructure. Dans un premier temps, un nouveau système de contrôle-commande (hardware et software) ainsi que des tiroirs gérant les sécurités de la machine sont développés, construits et mis en œuvre. Ils sont basés sur les travaux effectués pour la machine GENEPI-3C exploitée au SCK-CEN de Mol en Belgique pour le programme GUINEVERE. 11 modules sont nécessaires pour gérer la communication entre les composants de l'accélérateur et le PC de commande. Utilisant un noyau Linux embarqué, ils sont semblables aux modules développés par le service électronique pour GENEPI-3C. De même, le pilotage informatique s'appuie sur une version adaptée du code développé par le service informatique pour GUINEVERE. Cette jouvence doit permettre de fiabiliser le fonctionnement de la machine tout en apportant des fonctionnalités supplémentaires. Dans un second temps, l'accélérateur sera modifié afin de s'affranchir de la structure impulsionnelle du faisceau qui n'est plus requise pour les nouvelles expériences et d'augmenter le flux de neutrons pour minimiser les durées d'irradiations. Pour cela, une source ECR et un nouvel aimant de déviation sont à l'étude.

¹ *Techniques de l'Information et de la Microélectronique pour l'Architecture des systèmes intégrés, laboratoire CNRS/Grenoble INP/UJF, UMR 5159*

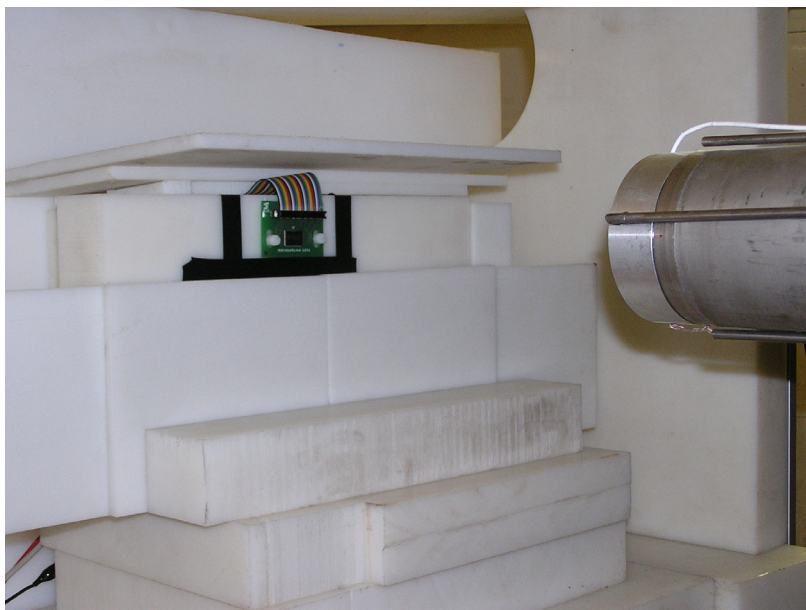


Figure 1 : Circuit imprimé en regard de la section terminale de la ligne de faisceau de GENEPI2 contenant la cible générant les neutrons.

L'accélérateur GENEPI-3C

*M. Baylac, A. Billebaud, P. Boge, E. Froidefond, E. Labussière, R. Micoud, S. Rey
T. Cabanel, M. Heusch, Service Détecteurs et Instrumentation
D. Bondoux, Service Études et Réalisations Mécaniques
J. Bouvier, D. Tourres, Service Électronique
G. Dargaud, Service Informatique*

The neutron generator GENEPI-3C is coupled to the fast nuclear core VENUS-F at SCK-CEN (Belgium) to study accelerator driven systems. Since the first coupling late 2011, this electrostatic accelerator drives the sub-critical core in different beam modes. Operational feedback is presented.

Le programme expérimental GUINEVERE exploite le pilotage d'un réacteur sous-critique par une source externe de neutrons fournie par un accélérateur. Le LPSC a conçu, construit et exploite l'accélérateur électrostatique GENEPI-3C (GENérateur de NEutrons Pulsé Intense et Continu) auprès du réacteur rapide VENUS-F, mis au point et opéré par le centre d'études nucléaires SCK-CEN de Mol (Belgique). GENEPI-3C produit des neutrons par impact de faisceaux de deutons sur une cible de Tritium située au centre du cœur du réacteur. Le programme expérimental, entrepris dans le cadre de programmes européens (GUINEVERE, FREYA), est mené au LPSC par le groupe de physique des réacteurs.

Suivant l'autorisation de couplage entre l'accélérateur et le réacteur obtenue à l'automne 2011, le commissioning a permis de valider le bon fonctionnement de la machine et des détecteurs de neutrons ainsi que la production neutronique. Le taux de production reproduit les prédictions et atteint $\sim 10^{11}$ n/s pour 1 mA de courant de faisceau avec une cible neuve. Depuis, la prise de données est en cours pour les campagnes expérimentales. La machine est exploitée alternativement dans 3 modes de fonctionnement : pulsé, continu (DC) et continu haché par des coupures de faisceau ajustables en fréquence et en durée (BT). Les conditions d'exploitation de la machine dépendent fortement du mode de faisceau :

le mode impulsif, éprouvé par les 2 précédentes machines GENEPI, est stable. Les caractéristiques de faisceau requises pour le programme expérimental sont atteintes, à l'exception de l'amplitude du courant (crête) qui demeure inférieure aux spécifications. Les puissances moyennes de faisceau mises en jeu sont faibles de par le cycle de la machine ($< 0,5\%$); les modes continus (DC et BT) présentent plus de difficultés, principalement car la source d'ions est plutôt adaptée à un fonctionnement impulsif et de par l'absence d'expérience préalable de ces conditions d'opération. Les spécifications de courant (1 mA sur cible) et de rapidité de coupure ($\sim \mu\text{s}$) sont atteintes, mais des limitations demeurent sur les plages de fonctionnement et la stabilité des interruptions programmables de faisceau. Ces modes mettent en jeu des puissances de faisceau importantes (jusqu'à 600 W au total) et sont plus propices aux problèmes de décharges électriques.

La principale difficulté du fonctionnement couplé de l'accélérateur avec le réacteur est liée aux phénomènes de décharges qui peuvent se produire à l'intérieur ou à l'extérieur des enceintes portées à de hautes tensions. Dans la plupart des cas, la décharge s'accompagne d'une perte momentanée du faisceau, générant la chute du taux de neutrons présents dans le cœur. Au retour brutal du fais-

ceau sur la cible, la production de neutrons, qui est constamment contrôlée par les moniteurs équipant le réacteur, croît très rapidement. Cet événement peut alors être interprété comme dangereux par le système de sécurité du réacteur, ce qui déclenche automatiquement son arrêt par chute des barres de sûreté (SCRAM). La récupération suite à un événement de ce type est très longue car elle nécessite le redémarrage complet du réacteur (~30 min) et représente la plus importante source d'arrêt (downtime) de l'installation (entre 0 et 6 SCRAMS en moyenne par semaine). Au cours des 2 années d'exploitation, deux périodes ont connu des taux de décharges tels qu'ils ont empêché le fonctionnement normal de la machine. Ces phénomènes semblent trouver leur origine dans les conditions environnementales de l'accélérateur électrostatique (humidité et chaleur pendant certains mois de l'année) et ont généré de lourds travaux de réparation. Pour l'avenir, des solutions sont envisagées pour à la fois minimiser le nombre de décharges, mais aussi réduire le taux de SCRAMS du réacteur généré par un claquage. D'autre part, les conditions de travail au SCK-CEN imposent deux arrêts annuels complets de l'accélérateur à l'été et à Noël. Le fonctionnement du filament de la source d'ions est souvent compromis par ces coupures et requiert également de nombreuses maintenances, préventives et curatives.

Depuis la mise en œuvre initiale de la machine et pendant ses 2 années d'exploitation, la charge intégrée sur la cible de production de neutrons mesurée quotidiennement s'est accrue d'un facteur ~8 jusqu'à plus de 5 C (correspondant à ~7,5 h de faisceau sur une journée effective de 8 h), attestant des progrès effectués sur la maîtrise de cette installation couplée. À la lumière de l'expérience acquise lors de l'exploitation, de nombreuses modifications ont été apportées au système de contrôle-commande. Celles-ci ont concerné la partie hardware mais surtout la partie software dans le but d'étendre et d'optimiser les fonctionnalités de ce système et d'en améliorer la fiabilité et l'ergonomie. Le retour d'expérience sur l'exploitation couplée de l'accélérateur est étudié dans le cadre du programme européen MAX (FP7).

Le pilotage de l'accélérateur est assuré par le service accélérateur, ce qui représente un investissement humain important (3 semaines sur 4 pendant les ~8 mois d'expériences chaque année). À terme, la conduite de la machine pourra être menée par un unique pilote du SCK-CEN, conjointement à celle du réacteur VENUS-F. À cet effet, les pilotes du réacteur ont suivi une formation théorique sur le fonctionnement et la conduite de GENEPI-3C et acquièrent depuis une expérience pratique au contact des conducteurs de la machine pendant son exploitation.

Les résultats de l'exploitation des données du réacteur piloté par l'accélérateur sont présentés dans le chapitre *Physique des réacteurs*.



Figure 1 : Partie terminale de la ligne de faisceau de GENEPI-3C insérée dans le réacteur VENUS-F.

Pour en savoir plus

M. Baylac et al., *Proceedings of the second International Workshop of Technology and Components of Accelerator Driven Systems (TCADS2)*, Nantes (France), May 21-23, 2013.

Prototype de source d'ions ECR à 60 GHz

T. Lamy, J. Angot, L. Bonny, J. Jacob, M. Marie-Jeanne, T. Thuillier, P. Sole, P. Sortais.
 D. Grondin, G. Calogero, G. Freche, C. Fourel, J. Giraud, S. Roni, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques
 M. Chala, Service Détecteurs et Instrumentation
 W. Regairaz, Service Sécurité
 Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
 Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science - Nizhny Novgorod, Russie.

Worldwide, the highest electromagnetic waves frequency presently used in ECR ion sources is 28 GHz. Since many years we collaborate with the Institute of Applied Physics (IAP) of the Russian Academy of Science (Nizhny-Novgorod) to initiate a research and development program toward higher frequencies. In 2008 we initiated a collaboration with the Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI of the CNRS-Grenoble) in order to develop a low cost magnetic structure for an ECR ion source accepting 60 GHz electromagnetic waves. The first beams at 18 GHz have been extracted from this prototype.

Suite à la réalisation d'un prototype de source d'ions utilisant les techniques d'aimant à champ intense (polyhélices à refroidissement radial) et suite aux mesures de champ magnétique effectuées, il avait été montré qu'une zone de résonance fermée à 1 tesla existait au centre de la chambre à plasma permettant l'établissement de la résonance cyclotronique électronique à 28 GHz (voir rapport d'activité 2010-2011) pour une intensité de 15000 A dans les polyhélices. Nous avons alors prévu une campagne expérimentale à cette fréquence, afin de caractériser les faisceaux d'ions extraits du prototype. Nous avons donc conçu et réalisé l'ensemble des pièces internes de la source. La figure 1 montre l'ensemble des pièces constituant la source proprement dite, inséré dans la structure magnétique. La chambre à plasma et le guide d'onde sont polarisés à la haute tension positive, ils sont isolés de la ligne de faisceau par l'alumine d'extraction et de la structure magnétique par deux isolants en PEEK (en haut à droite sur l'image). La chambre à plasma est équipée d'un anneau polarisable permettant de repousser les électrons ou les ions vers le centre de la chambre.

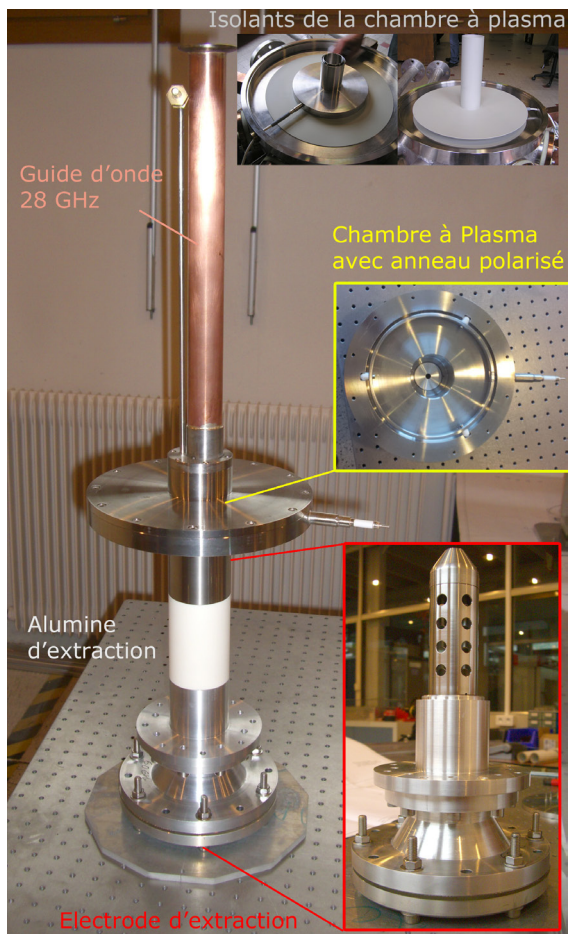


Fig. 1 : Pièces internes du prototype.

L'expérience a été remontée dans la salle de l'aimant M3 du LNCMI suite à la nécessité de libérer la place dans la salle M5, en particulier, il a fallu adapter le système hydraulique, en fonction des standards du laboratoire, comme montré

sur la figure 2. Une ligne de faisceau a été installée au LNCMI, elle est constituée d'une lentille de Einzel en sortie de source et d'un spectromètre magnétique, le faisceau étant mesuré dans une coupelle de Faraday. Le banc expérimental est montré figure 3.

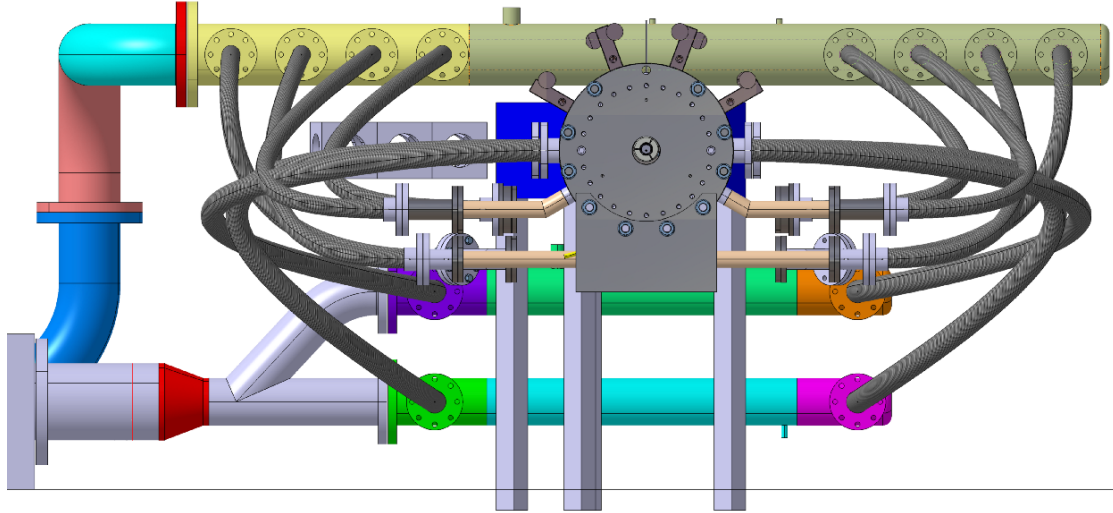


Fig. 2 : Système hydraulique de refroidissement du prototype.

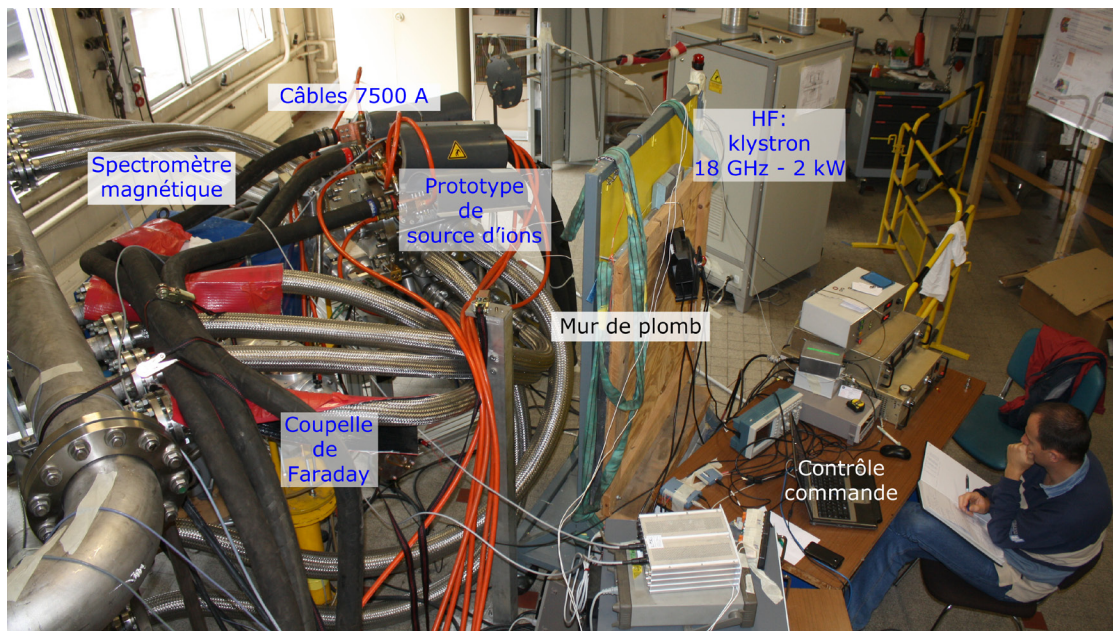


Fig. 3 : Installation du banc expérimental au LNCMI.

L'émetteur 28 GHz n'étant pas disponible au moment de l'expérience programmée, nous avons décidé de travailler à 18 GHz, remarquons que cette fréquence ECR n'a jamais été utilisée dans une structure magnétique en cusp présentant des champs magnétiques aussi élevés.

Les résultats principaux constatés lors de cette première campagne expérimentale sont :

- L'établissement du plasma à très basse puissance HF (quelques watts).
- La possibilité de produire des ions multichargés (Ar^{7+} a été observé).
- La possibilité de produire de fortes intensités d'ions de faibles charges (jusqu'à quelques mA).

Un exemple de spectre d'argon multichargé est montré figure 4.

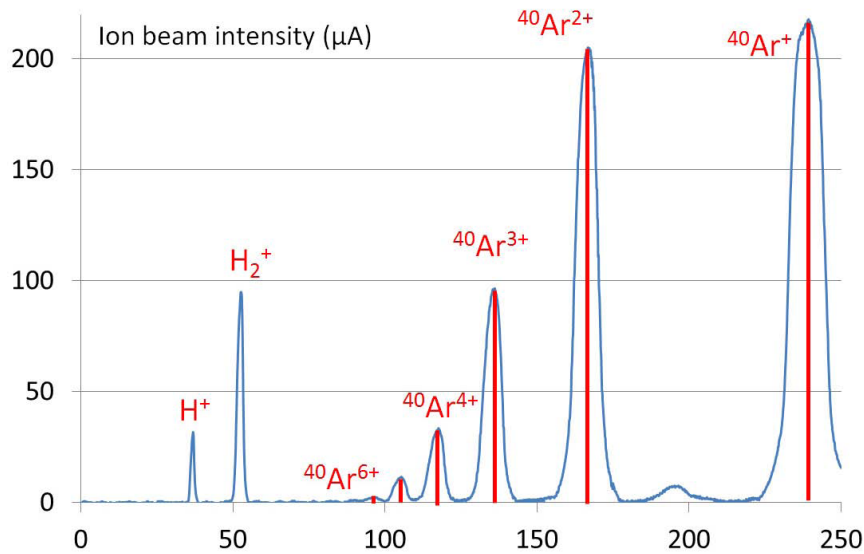


Fig. 4 : Spectre d'ions argon multichargés extraits du prototype à 18 GHz.

Suite à ces expériences de faisceaux, nous avons modifié la connexion du prototype aux alimentations du LNCMI afin de pouvoir atteindre 30 000 A à partir de deux alimentations (sur les 4 disponibles) et de câbles refroidis acceptant 7500 A en intensité électrique. Dans cette configuration, l'intensité dans les hélices d'injection et d'extraction est identique. À 21 500 A un court-circuit est apparu dans l'hélice de petit diamètre côté injection, ceci étant dû à un défaut de refroidissement localisé, ce problème est en cours de traitement.

À la fin de l'année 2012 nous avons finalisé un contrat ISTC (International Science and Technology Center) avec l'IAP-RAS de Nizhny Novgorod (Russie). Un gyrotron 60 GHz de puissance 300 kW et pulsé à 3 Hz a été installé au LNCMI par une équipe de la société GYCOM, ce gyrotron (Fig. 5), qui est maintenant propriété du CNRS, sera utilisé en mars 2014 pour produire les premiers faisceaux d'ions extraits d'un plasma ECR 60 GHz à zone de résonance topologiquement fermée.

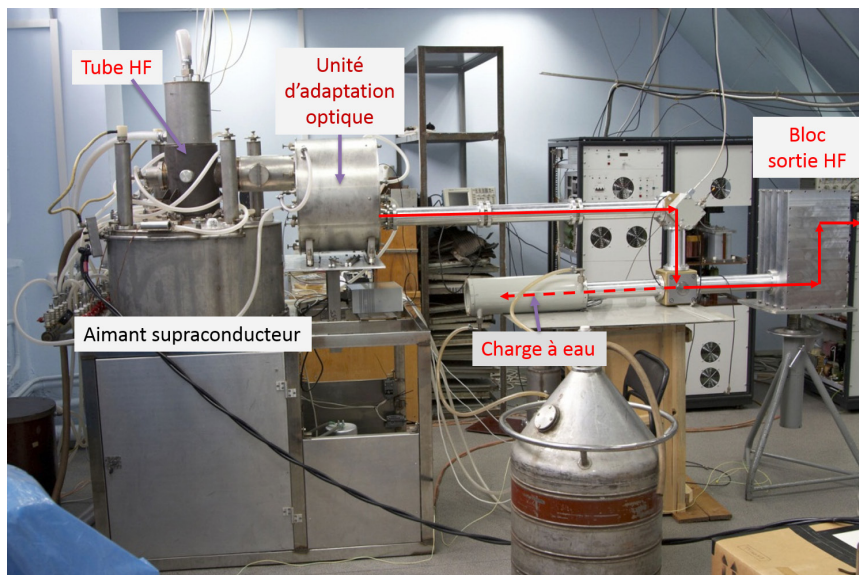


Fig. 5 : Gyrotron 300 kW 3 Hz du LPSC, installé au LNCMI par la société GYCOM.

Collaboration EMILIE

T. Lamy, J. Angot, J. Jacob, P. Sortais, T. Thuillier, P. Sole.

D. Grondin, D. Fombaron, J. Giraud, S. Roni, S. Roudier, Service d'Études et de Réalisations Mécaniques

Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, France

Laboratori Nazionali di Legnaro - INFN, Italy

Laboratori Nazionali del Sud - INFN, Italy

University of Jyväskylä, Finland

Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, Poland

The first objective of this European collaboration is to improve the knowledge of the phenomena involved in ECR charge breeding, especially the ones involved in the metallic ions capture. Within the same time, we performed the comparison of ECR ion sources and charge breeders efficiencies that may allow progresses in charge breeders and ECR ion sources performances.

Dans le cadre de la collaboration EMILIE (Enhanced Multi-Ionization of short-Lived Isotopes at EURISOL – contrat NuPNET) nous avons développé une source COMIC 2,45 GHz chaude ($T_{\max} = 650^{\circ}\text{C}$) dont l'objectif est de produire des faisceaux d'alcalins pour les études expérimentales avec le booster de charge. La conception mécanique a été réalisée en interne, tandis que les calculs ont été effectués par le service d'études et de réalisations mécaniques. Une étude de couplage HF a été effectuée afin de remplacer le câble coaxial d'amenée de l'hyperfréquence par un coaxial rigide supportant la température. Les aimants permanents permettant la résonance ECR ont été écartés de la cavité plasma afin de supprimer leur échauffement par conduction thermique et permettre l'installation d'un refroidissement par eau. La figure 1 montre le résultat de l'étude thermique, le point important est que la vapeur d'alcalins produite au niveau du four verra un gradient de température croissant en direction du plasma, ainsi la vapeur ne pourra se condenser sur une paroi plus froide et ceci permettra d'optimiser l'efficacité de la source. La figure 2 montre la source prête à être testée telle que réalisée en 2013. En 2014, la source sera tout d'abord testée du point de vue du couplage HF (production de faisceaux d'ions gazeux), puis des mesures de température seront faites afin de valider les simulations, enfin le développement de faisceaux d'alcalins sera effectué.

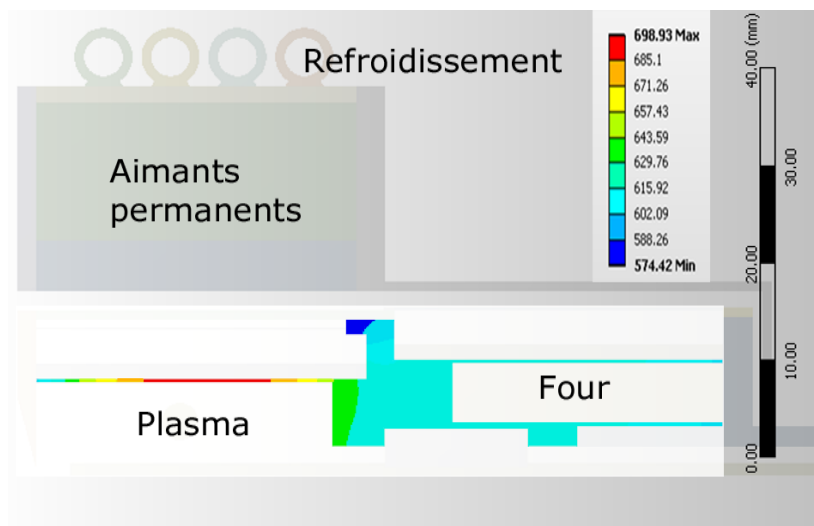


Fig. 1 : Résultat de l'étude thermique de la source COMIC chaude 650°C .

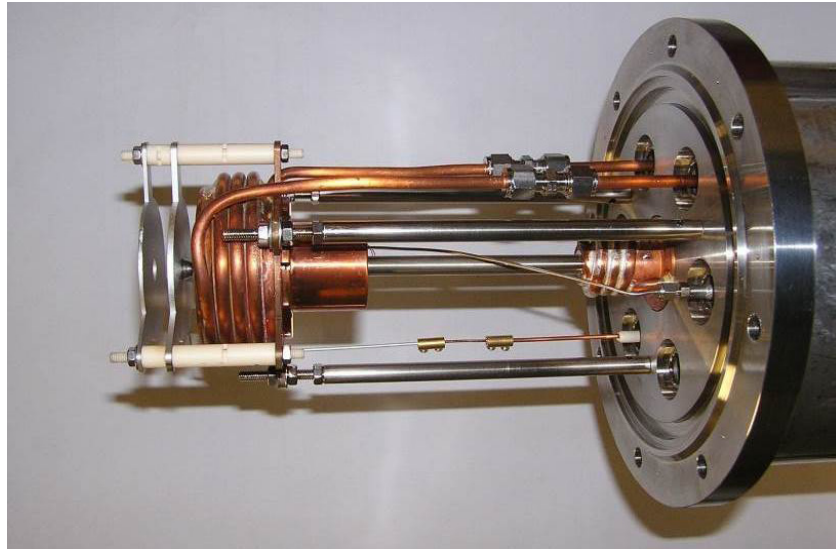


Fig. 2 : Source d'ions COMIC 2,45 GHz 650°C.

Afin d'améliorer la connaissance fondamentale du processus de capture d'un faisceau d'ions de basse énergie dans un plasma magnétisé, il est important de pouvoir injecter différents types de faisceaux, la source chaude décrite précédemment permettra de varier l'espèce chimique, tandis qu'une source présentant une plus grande densité de plasma permettra de produire des faisceaux d'ions de charges différentes. Pour cela nous avons débuté le développement d'une source de type COMIC à 5,8 GHz et de puissance moyenne (200 W). La structure magnétique de cette source, pour en limiter son coût, est formée d'aimants permanents NdFeB standards de dimensions 40 x 15 x 5 mm.

Le circuit HF est de type coaxial et a été calculé sur ANSYS-HFSS afin d'obtenir un champ électrique maximal vers l'électrode plasma de la source ou se trouve la résonance cyclotronique électronique (Fig. 3). La figure 4 montre la source telle que réalisée et prête à être testée.

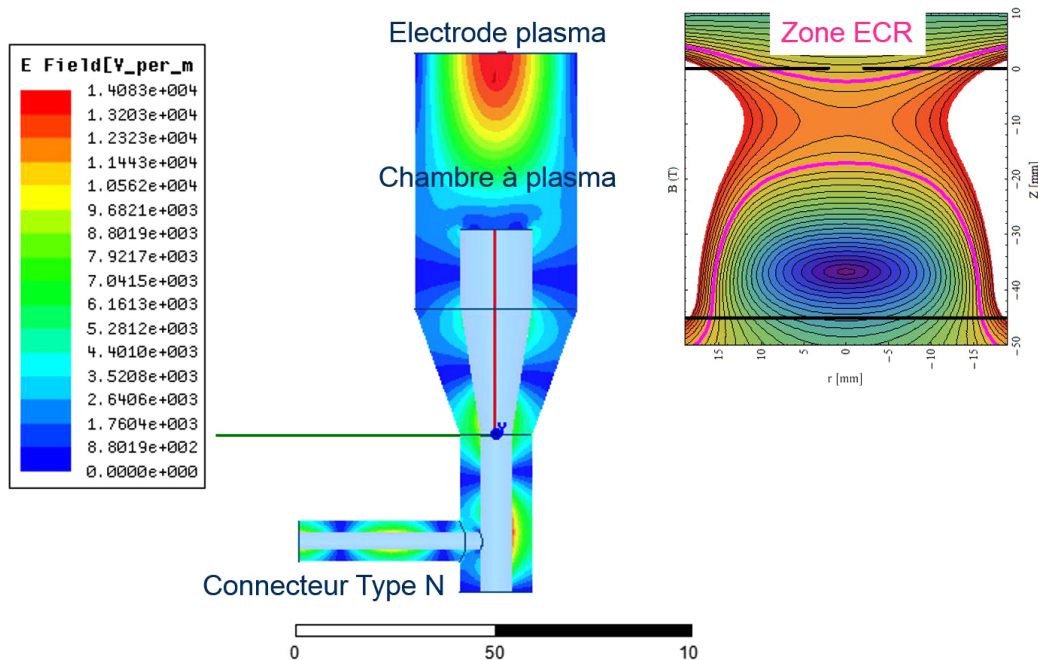


Fig. 3 : Source d'ions COMIC 5,8 GHz – simulation du couplage HF et résonance cyclotronique électronique.

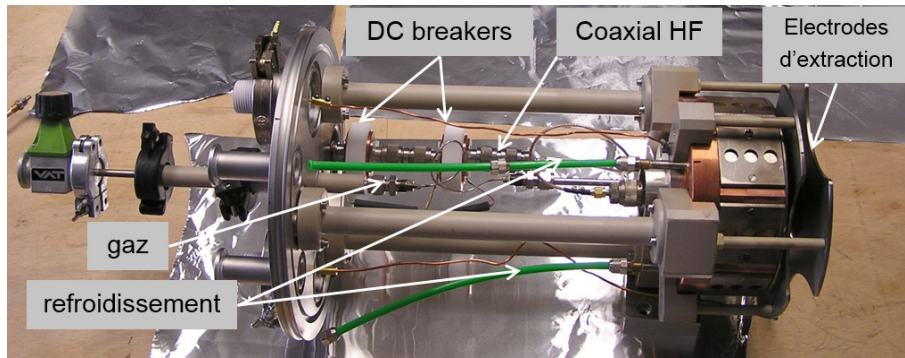


Fig. 4 : Source d'ions COMIC 5,8 GHz.

Les premiers faisceaux d'argon (Fig. 5) ont été produits en été 2013 afin de valider l'établissement du plasma, une structure à minimum-B sera construite en 2014 afin de produire des faisceaux d'ions de faible charge ($q =$ de 1 à 3 unités).

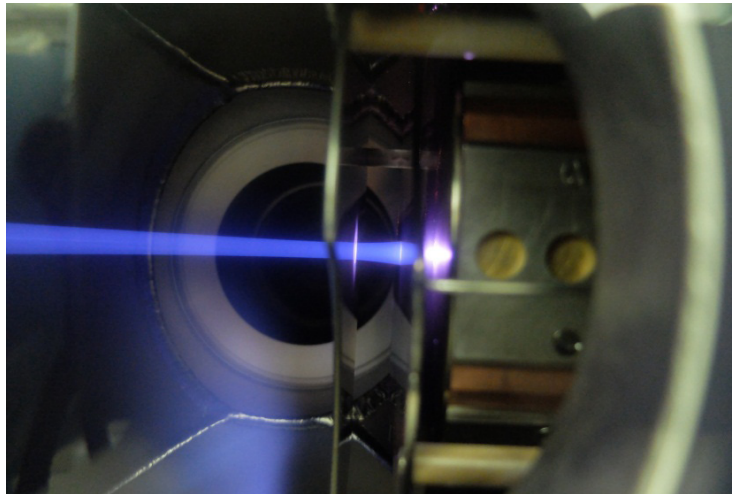


Fig. 5 : Premier faisceau d'ions Ar+ extraits de la source COMIC 5,8 GHz.

La ligne basse énergie du projet MYRRHA

M. Baylac, J.-M. De Conto, E. Froidefond, T. Lamy, S. Rey

P. de Lamberterie, Chargé de mission qualité

T. Cabanel, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation

D. Bondoux, C. Fourel, J. Giraud, Service Études et Réalisations Mécaniques

The MYRRHA project aim is the construction of an Accelerator Driven System prototype. The driver will be a 5 mA, 600 MeV linac. The Low Energy Beam Transport line (LEBT) is under construction at LPSC, including an ion source, two solenoids and a chopper. Beam diagnostics are designed to characterize the low energy deuteron beam.

MYRRHA (Multipurpose HYbrid Research Reactor for Hightech Applications) est un projet porté par le SCK-CEN, visant à réaliser un démonstrateur de réacteur nucléaire piloté par accélérateur (Accelerator Driven System ou ADS). Le cœur du réacteur, délivrant une puissance de 50-100 MWth, sera alimenté par des neutrons de spallation obtenus par l'impact d'un faisceau de 5 mA de protons sur une cible en Pb-Bi liquide. Ces protons sont délivrés en mode continu par un accélérateur linéaire supraconducteur avec le plus haut niveau possible de disponibilité de faisceau. L'accélérateur est composé d'un injecteur, redondant pour en maximiser la fiabilité, suivies de 2 sections accélératrices formées de cavités de type Spoke puis elliptiques portant le faisceau à une énergie de 600 MeV avant son transport sur la cible de spallation.

Dans la continuité des travaux menés par le LPSC sur GUINEVERE, maquette d'ADS (faisceau de 250 W, réacteur de 150 W), le laboratoire est engagé sur le projet MYRRHA. Dans une première phase de R&D dédiée à cette installation multi-mégawatts, le LPSC assure la construction, la mise en œuvre et les tests d'un prototype de la ligne de basse énergie (LEBT) de l'injecteur de protons (20 mA, 30 keV). Cette ligne a pour but de produire le faisceau de protons et de le mettre en forme pour son accélération dans le quadrupôle radiofréquence de l'injecteur. Elle comprend une source d'ions, fournie par un industriel, des éléments magnétiques combinés pour la focalisation et le guidage de faisceau, des diagnostics, un système de déviation rapide de faisceau (chopper), du pompage, un arrêt de faisceau et un système de contrôle-commande. La conception mécanique de la LEBT est en cours d'achèvement :

- Après définition, les éléments magnétiques sont en cours d'approvisionnement.
- La conception de l'arrêt de faisceau a été validée par des études thermiques.
- Un système de 4 fentes indépendantes pour l'ajustement réglable de l'extension spatiale transverse du faisceau a été conçu.
- Des diagnostics permettront la mesure de l'émittance et du profil des faisceaux.
- Après dimensionnement, les équipements du système de pompage ont été commandés. Le SCK est responsable de la conception et de la construction du chopper. Le développement du système de contrôle-commande de la ligne est mené par une collaboration entre le LPSC et un industriel. Un site a été aménagé pour accueillir la ligne qui sera caractérisée au laboratoire avant son transfert vers la Belgique. Cette ligne permettra d'étudier les faisceaux hadroniques de basse énergie, région particulièrement déterminante dans le transport des faisceaux intenses. Au-delà du projet MYRRHA, ces études bénéficieront à

tous les accélérateurs de hadrons de forte puissance actuels et futurs (ESS, SPIRAL2, FAIR...). Le programme expérimental est actuellement en cours de définition.

Pour en savoir plus

Site web MYRRHA: <http://myrrha.sckcen.be/>.

Contrat de fabrication de nappes polaires

M. Baylac, E. Froidefond

LPSC is in charge of the contract for the production and test of the 120 pole face windings for the main dipoles of the CERN PS. This contract has been closed in September 2013.

Dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France au CERN, l'accord technique n°5, financé grâce au Grand Emprunt, inclut la fourniture de 120 bobines de correction, les « nappes polaires », destinées aux corrections de champs des 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. Ces nouvelles bobines sont destinées à pallier toute panne de ces éléments primordiaux dans la fourniture de faisceau par le PS au LHC. Le cahier des charges, repris des anciennes fabrications, a été révisé afin d'améliorer la qualité de fabrication et ainsi d'augmenter la fiabilité des nappes polaires.

Le contrat conclu avec la société SigmaPhi, basée à Vannes (Bretagne), s'est terminé au mois de septembre 2013, après une fabrication longue et problématique. La réalisation des nappes polaires réclame en effet une grande maîtrise technique. La finesse de l'objet et la sévérité des essais obligent à respecter strictement les cotes et contraintes de fabrication, tant lors de la réalisation des bobines que lors du moulage de celles-ci. Le temps de formation des opérateurs recrutés pour ce contrat est donc très long afin d'obtenir la stricte maîtrise des procédures de fabrication, ce qui ne va pas sans un taux de pertes élevé.

L'amélioration de la qualité des nappes polaires fournies a nécessité la fabrication de cinq préséries afin de corriger certains défauts. Malgré cela, la réalisation de la série a révélé des problèmes techniques supplémentaires lors de la formation des opérateurs, nécessitant parfois d'apporter des précisions dans la description des procédures.

Durant toute la durée de ce contrat, près d'une centaine de visites à l'usine auront été nécessaires afin d'assurer un suivi conforme à cette fabrication exigeante. L'aide apportée par Subatech, depuis Nantes, pour assurer ce suivi a été déterminante par la qualité du personnel dédié.

Ce travail a été complété par l'étude et la réalisation d'un banc d'essai automatisé. Il sert à la réalisation des essais de réception au CERN, mêlant mesures de précision et hautes tensions. Le but étant de vérifier que les nappes n'ont pas subi de dommage pendant le transport, ce banc ne reproduit qu'une partie des essais réalisés par l'industriel.

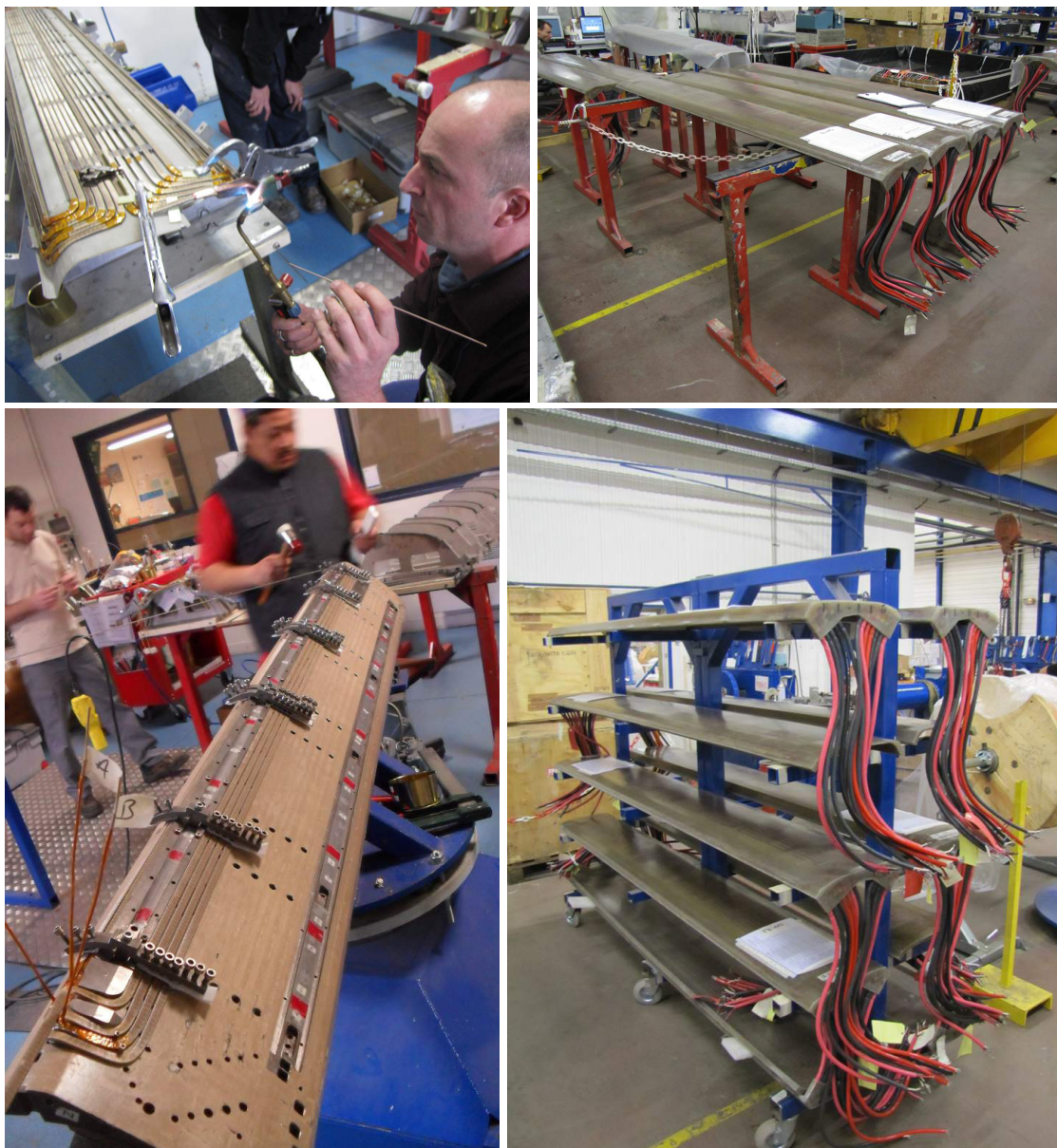


Fig. 1 : Réalisation des nappes polaires pour le CERN-P.

Autres projets et activités

M. Baylac, J.-M. De Conto, N. Monseu

Three additional activities are led at LPSC: fundamental studies of the beam polarization in the SUPERB project, networking activities within FP6 (RFTECH) and support for industry inside the laboratory buildings.

Études pour le projet SUPERB

L'étude du transport de la polarisation du faisceau a fait l'objet d'un travail de thèse. Dans un anneau de stockage, où les effets de rayonnement sont importants, la polarisation obtenue dépend directement du champ invariant de spin (ISF), qui est un invariant global sur un tour, et qui est défini sur l'espace des phases à 6 dimensions de la machine. Sa détermination permet de déduire la polarisation du faisceau en y incorporant les expressions analytiques du rayonnement synchrotron. Le but de la thèse était de montrer que méthode classique de tracking de particules, incorporant la dynamique du spin, permettait de reconstruire cet invariant de manière numérique et dans des champs réalistes (par opposition aux modèles du type lentilles minces ou champs à bord franc) et pour des trajectoires quasi-périodiques. Une méthode de moyenne de construction de l'ISF a été mise en œuvre avec succès, montrant notamment que le transport rétrograde permettait de s'affranchir de la périodicité non-strict.

RFTECH

RFTECH est une activité de réseau financée dans le cadre de FP6 et incluant de nombreux laboratoires européens. Cette activité a été coordonnée par le LPSC. Elle consistait à l'organisation de workshops annuels (Hambourg, Villigen, Rostock et Annecy) regroupant de 20 à 30 participants. Elle a permis de faire la synthèse sur les différentes problématiques de la radiofréquence accélérateurs : modélisation et calculs, systèmes de puissance (amplificateurs à état solide notamment), architecture micro-électronique, électronique de bas niveau, etc. Elle a permis de réunir les différentes communautés, domaines et projets confondus. Elle a permis le support à la participation à de nombreuses conférences comme la conférence MIXDES ou celui de nombreux workshops (International Low-Level RF workshop par exemple).

Essais d'accélérateurs industriels au LPSC

Depuis 2012, l'équipe des accélérateurs du LPSC met à disposition des locaux pour les essais de mise en service d'accélérateurs linéaires intenses d'électrons conçus par un industriel (PMB). Ces machines sont dédiées à la génération de hautes doses de rayons X (jusqu'à 30 Gy/min). La mise en œuvre de ces machines requiert donc un important niveau de blindage qui n'est, à l'heure actuelle, pas disponible auprès de la société développant ces accélérateurs.

La casemate du cyclotron de SARA, accélérateur à l'arrêt depuis 1997, fournit des locaux parfaitement adaptés en termes de blindage au fonctionnement de ces accélérateurs intenses. La casemate a été aménagée pour permettre l'installation et la mise en œuvre de ces machines. Depuis, plusieurs machines ont été accueillies pour des essais de mise en service.



Figure 1 : Accélérateurs linéaires à électrons en tests dans la casemate du cyclotron SARA.