

# Accélérateurs et Sources d'ions, Plasmas

## Pôle Accélérateurs et Sources d'ions

Le Pôle Accélérateurs et Sources d'ions du laboratoire a pour mission de concevoir et réaliser des accélérateurs, ou des sous-systèmes d'accélérateurs, et des sources d'ions pour les programmes de physique et pour certaines applications industrielles. Cette discipline aborde un large spectre des thématiques de recherche du laboratoire : physique nucléaire (neutronique, physique des réacteurs, production de faisceaux d'ions radioactifs), physique des accélérateurs (dynamique de faisceau, radiofréquence), applications des faisceaux d'ions.

La période 2014-2015 consacre le franchissement d'étapes essentielles pour les projets du pôle. Pour le grand projet national SPIRAL2, la source d'ions lourds dédiée au démarrage de l'accélérateur, Phoenix V2, a été installée et mise en service au GANIL : elle a fourni les premiers faisceaux nécessaires aux réglages de la machine mi 2015. Parallèlement, une nouvelle version de cette source, optimisée pour la production des ions métalliques, a été développée au laboratoire. La série des 28 coupleurs RF destinés à transférer la puissance aux cavités accélératrices du LINAC supraconducteur a été préparée et conditionnée. Les coupleurs ont été validés sur les cryomodules, qui sont actuellement en cours d'installation sur le LINAC au GANIL.

Le pôle travaille dans la thématique des systèmes nucléaires sous-critiques pilotés par accélérateurs (ADS) depuis l'échelle de la maquette jusqu'à celle du démonstrateur. L'accélérateur GENEPI-3C est exploité pour le pilotage d'un réacteur d'étude de basse puissance sur le site du SCK-CEN de Mol (Belgique). De nombreuses optimisations de l'accélérateur ont été apportées afin de fiabiliser l'installation. Dans le cadre de MYRRHA, projet d'ADS dans la gamme multi-MW porté par le SCK-CEN, le premier tronçon de l'accélérateur, destiné à la production et à la mise en forme du faisceau, a été développé au LPSC. Des expérimentations sont menées pour étudier la physique des faisceaux intenses à basse énergie.

Le pôle a mené un programme de R&D sur une large palette d'applications des sources d'ions à la résonance électronique cyclotronique : source d'amplification d'état de charge (ou booster), source miniaturisée, source à très haute fréquence. Dans le cadre du projet EMILIE, le pôle a accueilli les partenaires de la collaboration européenne pour des études expérimentales sur le booster du LPSC et il a étudié différentes voies d'amélioration qui seront apportées à cette source. Les développements de la source compacte fonctionnant à la fréquence de 5,8 GHz ont été poursuivis. Au vu des excellentes performances obtenues lors de sa qualification, la source équipera le générateur de neutrons du laboratoire GENEPI2. Enfin, les tests du prototype innovant de source ECR fonctionnant à 60 GHz, menés sur le site du Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, présentent des résultats uniques au monde.

La plateforme neutronique GENEPI2 ainsi que les activités de valorisation, incluant la création de la startup Polygon Physics, sont présentées dans le chapitre *Plateformes technologiques, Valorisation et Transfert de technologies*.

### Plasmas-Matériaux-Nanostructures

L'activité du groupe Plasmas-Matériaux-Nanostructures porte principalement sur la recherche et développement des sources plasmas micro-onde à fort rendement énergétique pour des études fondamentales sur la production d'espèces, sur l'interaction d'espèces avec la surface et sur l'élaboration de micro-nanostructures intégrables dans les technologies miniaturisées. Cette activité est menée sur des dispositifs conçus et développés au LPSC à travers des projets de recherche fondamentale et appliquée visant l'émergence des technologies plasma pour des nouvelles applications. Dans le principal domaine d'application qui couvre les technologies en couches minces, l'activité de recherche concerne des procédés très spécifiques résultant des études fondamentales menées, d'une part, sur l'élaboration de micro-nanostructures par plasma, et d'autre part, sur la production d'espèces et leur interaction avec la surface. Outre leur application et insertion dans des projets génériques du LPSC, ces études s'inscrivent dans des thématiques définies et structurées au sein du Laboratoire International Associé – Science et Technologies Plasma (LIA-STEP), de l'Institut Carnot – Énergies du Futur, de la Fédération de Recherche Fusion et Confinement Magnétique (FR-FCM), du GIS -TED / IN2P3/ UGA, ainsi que du GDRI-NMC (Groupement de Recherche International Nanomatériaux Multifonctionnels Contrôlés, CNRS-Institut d'Outremont Montréal), auxquels le groupe est associé.

# Le projet SPIRAL2

J. Angot, M. Baylac, P. Boge, L. Bonny, T. Cabanel, Y. Gómez Martínez, J. Jacob, T. Lamy, R. Micoud, P. Sole, T. Thuillier  
D. Bondoux, D. Fombaron, C. Fourel, G. Freche, C. Geraci, J. Giraud, D. Grondin, M. Legrand, J.-C. Malacour, S. Roni, S. Roudier, F. Vezzu (Service Études et Réalisations Mécaniques)  
J.-P. Scordilis, S. Muggeo, E. Tourba, C. Vescovi (Service Électronique)  
C. Deslorieux, F. Petiot (Service Administratif, Personnel et Financier)  
P. de Lamberterie (Qualité)  
W. Regairaz (Service Sécurité et Radioprotection)

*LPSC is involved in the SPIRAL2 accelerator project for more than 10 years. The Accelerator and Ion Source Pole has the responsibility to deliver the set of radiofrequency couplers for the superconducting cavities and the electron cyclotron resonance heavy ion source. The PHOENIX V2 source is now installed in the SPIRAL2 tunnel at GANIL and its first heavy ion beam was extracted in July 2015. The source commissioning is under progress. In parallel, a source upgrade named PHOENIX V3, funded by the CRISP EU project, was carried out. This new source was assembled in 2015 at LPSC and will be extensively commissioned on a refurbished and upgraded test bench, before being transferred to GANIL. The 28 RF power couplers have been successfully tested and ten of them are now installed in the superconducting linac.*

## Introduction

SPIRAL2 est un projet d'extension du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds de Caen. Le projet se compose principalement d'un accélérateur linéaire qui alimente plusieurs salles de physique. Le LPSC participe activement depuis 2004 à l'effort national de conception et de réalisation de ce nouvel instrument. Le pôle accélérateur et source d'ions est (ou a été) responsable de plusieurs lots de tâches : la fourniture des coupleurs de puissance pour les cavités supraconductrices du LINAC, la fourniture de la source d'ions lourds pour l'injection de faisceaux  $Q/A=1/3$ , l'étude mécanique complète de la source d'ions booster et de sa ligne verticale de transport.

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

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

La source d'ions lourds ECR PHOENIX V2, développée et testée au LPSC jusqu'en 2013, a été livrée au GANIL en mai 2014. Une équipe du pôle et de l'IPNL est intervenue au niveau -2 du nouveau bâtiment SPIRAL2 pour raccorder la source et son système d'extraction des ions à la ligne basse énergie (ligne précédemment assemblée et testée au LPSC). Le chantier a continué avec la phase complexe de raccordement des fluides et du câblage, travaux sous-traités à des entreprises. Après avoir démarré avec succès la source de deutons de l'accélérateur (fournie par le CEA IRFU), en décembre 2014, l'effort s'est ensuite reporté sur la mise en route de la ligne basse énergie et de la source d'ions lourds. Des missions des agents du pôle vers le GANIL se sont déroulées ensuite pour valider le câblage, les raccordements aux fluides et le bon fonctionnement des instruments via le logiciel de contrôle commande. Le premier faisceau d'ions de la source  $Q/A=1/3$  a été produit avec succès en juillet 2015 (figure 1). Un effort particulier a été porté à l'amélioration de la compatibilité électromagnétique des équipements à proximité de la source, en concertation avec le groupe de production des ions du GANIL. Le système d'extraction électrostatique de la source d'ions a ensuite été conditionné jusqu'à atteindre la tension nominale de fonctionnement de 60 kV. Pendant la phase de mise en route de l'accélérateur, une étape importante est l'étude des réglages machine qu'il faut comparer aux simulations. Des pertes de faisceau peuvent se produire. Les faisceaux de deutons accélérés risquant d'activer la machine, c'est la source PHOENIX V2 qui est utilisée pour étudier ces réglages, en fournissant un faisceau de noyaux d'hélium ( ${}^4\text{He}^{2+}$ ). En effet, cet ion a le même rapport de masse sur charge que l'ion deutérium  $\text{D}^+$ , et la machine peut être réglée avec l'hélium sans risque d'activation pour l'accélérateur. Les premiers faisceaux d'ions plus lourds comme l'oxygène  $6+$  ou l'argon  $14+$  seront accélérés en 2016, lorsque le quadripôle radiofréquence (RFQ) de l'injecteur aura atteint ses caractéristiques nominales.

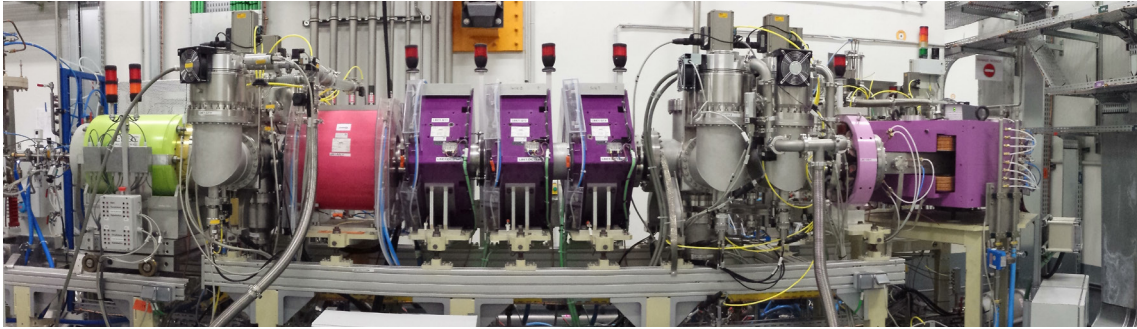


Fig. 1 : Photo de la ligne basse énergie d'ions lourds, installée dans le bâtiment SPIRAL2 à Caen, équipée de la source d'ions PHOENIX V2 fournie par le LPSC (instrument visible à gauche de couleur vert pomme).

Le LPSC a assuré la coordination d'un lot de tâches du projet européen CRISP<sup>1</sup> sur la période 2011-2014. Dans ce cadre, le LPSC a conçu et développé, en concertation avec le GANIL, une version améliorée de la source d'ions lourds, nommée PHOENIX V3. L'objectif est d'améliorer les intensités de faisceaux d'ions métalliques produits par la source afin de mieux répondre aux besoins de l'expérience S3. La conception mécanique, réalisée par le Service Études et Réalisations Mécaniques, s'est achevée en 2014 (figure 2). Équipée d'une chambre à plasma de grand diamètre, cette nouvelle version peut accueillir des fours de grandes dimensions, ce qui permettra d'augmenter le flux de vapeurs métalliques vers le plasma et *in fine* les intensités d'ions extraites de la source.

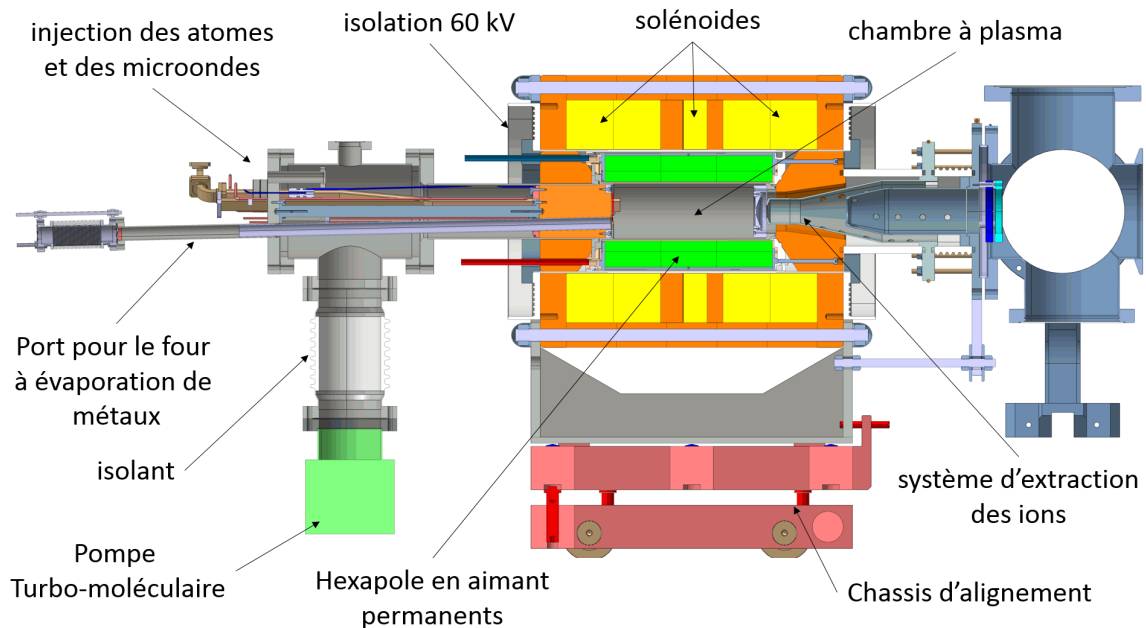


Fig. 2 : Vue en coupe de la conception de la nouvelle source d'ions PHOENIX V3 développée dans le cadre du contrat européen CRISP. On y distingue le système de pompage ultravide sur la gauche à l'arrière de la source, la chambre à plasma au centre et le système d'extraction des ions multi-électrode à droite.

### Les coupleurs RF de puissance

Le pôle Accélérateurs et Sources d'ions du LPSC est en charge de la réception, de la préparation, et du test des 28 coupleurs radiofréquence (et de ses compensateurs mécaniques) de l'accélérateur SPIRAL2.

Ces coupleurs radiofréquence (figure 3) sont, du point de vue mécanique, des structures coaxiales de 40 cm de long avec une forme étudiée pour permettre le transfert maximal de puissance (mieux que 99,7%) des amplificateurs radiofréquence (88,05 MHz) aux cavités accélératrices. Le transfert de puissance nominal, par coupleur, est de 14 kW en continu (CW), ce qui correspond au courant maximum prévu sur SPIRAL2 (5 mA deutons), et compte tenu du gain d'énergie requis par cavité (gradient accélérateur nominal de 6,5 MV/m sur 0,41 m).

<sup>1</sup> The Cluster of Research Infrastructures for Synergies in Physics, co-funded by the partners and the European Commission under the 7<sup>th</sup> Framework Programme Grant Agreement 283745, <http://www.crisp-fp7.eu/about-crisp/>

Les coupleurs sont constitués :

- D'un conducteur externe, avec des écrans de thermalisation situés dans des lieux appropriés pour minimiser le flux thermique vers les cavités (4,2 K).
- D'une antenne creuse (pour minimiser les vibrations) et fixe. Ceci implique un fonctionnement désadapté, avec de la puissance réfléchie lorsque l'on est en dehors du point de couplage nominal.
- D'une céramique disque de 6 mm d'épaisseur pour assurer l'étanchéité entre le vide secondaire de  $10^{-8}$  mbar et l'air ambiant.

Le coupleur assume donc un rôle de transfert de puissance radiofréquence, d'étanchéité du vide et de transition thermique.

Le coupleur est placé sur un ensemble mécanique qui sert à compenser les efforts qui apparaissent pendant la mise sous vide des cavités, à compenser la contraction due à la mise en froid (jusqu'à 4,2 K) de la cavité, et à tenir la céramique sèche, propre, et à température ambiante.



Fig. 3 : Série des coupleurs RF de puissance pour le linac de SPIRAL2.

Le coupleur est monté directement sur les cavités supraconductrices. Ainsi, une haute qualité de surface du coupleur (antenne électropolie, toute pièce métallique désoxydée) et un haut niveau de propreté sur le coupleur sont requis. Pour cela les coupleurs sont contrôlés et assemblés sur une hotte ISO4. À chaque étape du montage du coupleur des contrôles de particules sont réalisés. Le contrôle consiste à souffler de l'azote filtré sous 5 bars. La mesure de particules ne doit détecter aucune particule plus grande que  $5 \mu\text{m}$  et moins de 100 particules plus petites que  $0,5 \mu\text{m}$ . Ne pas tenir cette spécification implique un nouveau nettoyage complet du coupleur.

Début 2015, nous avons fini de préparer et de tester tous les coupleurs. Ils ont été testés avec succès dans les cavités et, aujourd'hui, 10 d'entre eux ont été installés dans le LINAC de SPIRAL2. La fin de l'installation dans le LINAC est prévue pour fin 2016.

### **Pour en savoir plus**

- » *Status of the SPIRAL2 injector commissioning*, T. Thuillier et al., *Rev. of Scient. Instrum.* 87, 02A733 (2016)
- » *Last Spiral2 Couplers Preparation and RF Conditioning*, Y. Gómez Martínez et al., *Proceedings of SRF2013*, Paris, France, <http://epaper.kek.jp/SRF2013/papers/thp054.pdf>
- » *Performance of Spiral 2 low and high Beta Cryomodules*, C. Marchand et al., *Proceedings of SRF2015*, Whistler, BC, Canada, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2015/papers/web04.pdf>

# Développement de la source d'ions ECR à 5,8 GHz

J. Angot, L. Bonny, J. Jacob, T. Lamy, P. Sole, T. Thuillier  
D. Fombaron, S. Roudier, J.-C. Malacour (Service Études et Réalisations Mécaniques)

*The accelerator and ion sources pole develops a compact 5.8 GHz ion source suitable for research accelerators and industrial applications. The performances of this source and its reliability were greatly improved over the last two years.*

Le pôle Accélérateur et Sources d'ions a poursuivi le développement et les tests de la source d'ions ECR fonctionnant à la haute fréquence (HF) de 5,8 GHz en apportant de nombreuses modifications afin d'améliorer ses performances et sa fiabilité. L'objectif de ce développement est de mettre au point une source d'ions compacte, très bon marché, utilisable dans les laboratoires et l'industrie et fournissant des intensités de faisceau de protons ou d'ions moyennement chargés, de l'ordre du mA.

La fiabilité de la source a en particulier été améliorée grâce à l'ajout d'un système de refroidissement du coaxial amenant la puissance HF. Le couplage de la HF au plasma a également été amélioré grâce à un système d'accord manuel qui, une fois optimisé, fournit un fonctionnement de la source optimal et reproductible. Ce couplage a pu être validé sans plasma en mesurant la puissance réfléchie et en comparant les résultats aux simulations. Le système d'extraction a été modifié par l'ajout de deux électrodes pour améliorer les caractéristiques du faisceau.

Cette source a été qualifiée sur la Ligne Haute Intensité (LHI) en produisant des faisceaux d'Argon. Elle a montré de bonnes capacités à produire des intensités importantes de faisceaux mono-chargés à faible puissance, par exemple 2 mA de courant total ont été extraits pour une puissance injectée de 7 W.

Dans le but de produire des faisceaux d'ions avec un état de charge moyen, une seconde version de la source basée sur une structure magnétique dite à « minimum B » a été conçue par simulation, puis réalisée. Afin de rendre la source adaptable à plusieurs utilisations, elle a été conçue pour être montée avec différentes structures magnétiques interchangeable. Ce dispositif a fait l'objet d'un brevet qui a été déposé en décembre 2013.

Dans la seconde version de la source, le refroidissement de la chambre à plasma a été optimisé et un dispositif HF permettant d'obtenir une meilleure utilisation de la puissance a été installé.

Pour les deux versions, le Service Études et Réalisations Mécaniques du LPSC a pris en charge l'usinage de pièces très techniques, obtenues notamment en découpe par fil, ainsi que les soudures étanches au vide.

Après assemblage (figure 1), la deuxième version de la source a été installée sur la LHI en Juin 2015.

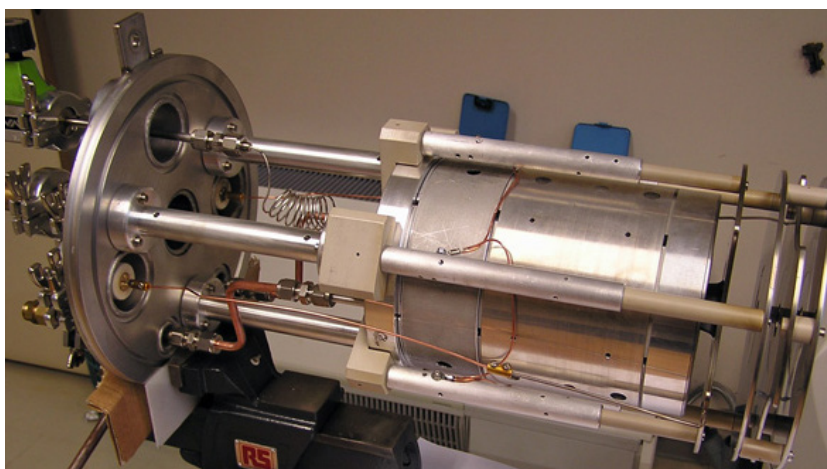


Fig. 1 : Source 5,8 GHz (seconde version) assemblée.

Elle a tout d'abord été testée en Argon et des faisceaux de charge 1+, 2+ et 3+ ont pu être produits. Des essais ont également été conduits pour mesurer ses capacités de production de protons. Au vu de ses excellentes performances (1 mA de protons produits pour environ 60 W de puissance HF), la source a été retenue pour équiper l'accélérateur GENEPI2 du LPSC.

# Exploitation de l'accélérateur GENEPI-3C

M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, E. Labussière, R. Micoud, S. Rey

A. Billebaud (Groupe Physique des Réacteurs Nucléaires)

J. Bouvier, D. Tournès (Service Électronique)

G. Dargaud (Service Informatique)

M. Heusch (Service Détecteurs et Instrumentation)

*Since 2011, GENEPI-3C, an electrostatic deuteron accelerator producing neutrons, is coupled to a sub-critical fast nuclear reactor to study accelerator driven systems (ADS). This neutron generator is operated by LPSC on the site of SCK-CEN in Mol (Belgium). This accelerator delivers beam in different modes required for the experimental program. Machine operation and performances are presented.*

Dans le cadre des études sur les réacteurs pilotés par accélérateurs ou Accelerator Driven Systems (ADS), le LPSC contribue à l'exploitation d'une maquette expérimentale. L'installation est constituée du réacteur nucléaire rapide VENUS-F, conçu et opéré par le SCK-CEN de Mol en Belgique, et l'accélérateur GENEPI-3C fournissant une source externe de neutrons. Cet instrument est mis en œuvre pour des études entreprises par le groupe de physique des réacteurs du laboratoire en collaboration avec différents partenaires, français et étrangers, dans le cadre du projet européen FREYA (cf section *Physique des réacteurs*). L'accélérateur a été conçu, développé, et mis en œuvre par le LPSC en collaboration avec des laboratoires de l'IN2P3. Le couplage de l'accélérateur avec le réacteur a eu lieu fin 2011. Depuis, le pôle assure l'exploitation de l'accélérateur pour le programme de physique.

Le GÉNérateur de NEutrons Pulsé Intense et Continu (GENEPI-3C) produit des neutrons par la réaction de fusion  $T(d,n)^4He$  produite par l'impact d'un faisceau de deutons de 250 keV sur une cible de Tritium. Il s'agit d'un accélérateur électrostatique utilisant une source d'ions portée à la très haute tension, d'une ligne de transport horizontale, d'un dipôle de déviation et d'une ligne verticale acheminant les faisceaux sur la cible située au centre du cœur du réacteur. Pour satisfaire les besoins du programme expérimental, la machine doit délivrer alternativement des faisceaux dans différents modes :

- Production de deutons sous forme d'impulsions intenses ( $\sim 20$  mA) et brèves ( $< 1$   $\mu$ s).
- Production de deutons de manière continue jusqu'à 1 mA, potentiellement interrompue par des coupures de faisceau programmables, ajustables en fréquence et en durée.

Les 2 premières années d'exploitation (2012-13) ont permis de valider les performances de la machine dans les différents modes de faisceaux (intensité, transport et structure temporelle) et de produire les premiers travaux de physique. Cependant, des difficultés opérationnelles ont limité la fiabilité de l'accélérateur. La principale source d'arrêt de cette installation couplée accélérateur-réacteur est liée aux phénomènes de décharges des éléments portés à de hautes tensions. Si la décharge s'accompagne d'une perte momentanée du faisceau, donc de la chute du taux de neutrons générés dans le cœur, le retour brutal du faisceau sur cible déclenche une hausse très rapide de la production de neutrons. Cette situation, interprétée comme anormale par le système de sécurité du réacteur, déclenche alors automatiquement son arrêt par chute des barres de sûreté (SCRAM). Un redémarrage complet du réacteur est alors nécessaire pour la reprise d'exploitation, immobilisant celui-ci pendant 30 mn environ. De lourds travaux ont été menés pour limiter ces phénomènes de décharge : amélioration de la comptabilité électromagnétique, fiabilisation de l'électronique, optimisation du transport de faisceau et traitement de l'environnement de la cage de Faraday (température et hygrométrie). L'accélérateur a été mis à l'arrêt et découplé du réacteur mi 2014 pour exploiter le réacteur en mode critique. Des travaux de maintenance puis la reprise de fonctionnement ont eu lieu à l'automne 2015. Après des difficultés techniques rencontrées lors du redémarrage, l'exploitation de l'accélérateur a été reprise par les personnels du pôle, nécessitant de très nombreuses missions en Belgique. Les améliorations de l'installation ont permis d'augmenter significativement la disponibilité de l'installation. Fin 2015, le processus de formation des pilotes du réacteur pour la conduite de l'accélérateur est en cours afin de permettre aux personnels du SCK-CEN l'autonomie pour le pilotage de l'installation couplée, accélérateur et réacteur.

### Pour en savoir plus

» *Operation of the versatile accelerator driving the low power ADS GUINEVERE at SCK-CEN, M. Baylac et al., 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Conference (LINAC14) Sep 2014, Geneva, Switzerland. JACOW pp659-661, 2014*

## Sources ECR à très haute fréquence (60 GHz)

J. Angot, L. Bonny, J. Jacob, T. Lamy, P. Sole, T. Thuillier

C. Fourel, G. Freche, J. Giraud, J.-C. Malacour, A. Mantel (Service Études et Réalisations Mécaniques)

M. Chala (Service Détecteurs et Instrumentation)

W. Regairaz (Service Sécurité et Radioprotection)

*Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS) deliver high beam intensities. Worldwide, the increase of the resonance frequency is the main development for high performance ECRIS. LPSC has developed, in collaboration with the Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses and the Institute of Applied Physics – Russian Academy of Sciences (IAP-RAS), the first ion source prototype having a topologically closed resonance zone at 60 GHz corresponding to a magnetic field of 2.14 T. First ion beams have been extracted from the 60 GHz ECR plasma, extremely high intensities of multicharged ions have been observed.*

### Dispositif expérimental et principaux résultats

Le prototype de source d'ions développé utilise une structure magnétique réalisée à partir de 4 hélices à refroidissement radial. Celle-ci génère un champ magnétique à minimum-B dont l'induction croît dans toutes les directions à partir du centre de la structure où le champ est nul. Ainsi au-dessus d'une intensité électrique de 21 000 A parcourant les hélices, une induction magnétique de 2,14 T est établie sur une surface n'interceptant pas les parois matérielles de la source. Afin d'obtenir des latitudes de réglages, l'induction magnétique a été mesurée jusqu'à une intensité de 26 000 A. La figure 1 montre la mesure de l'induction axiale sur l'axe du prototype superposée à une vue en coupe de la source.

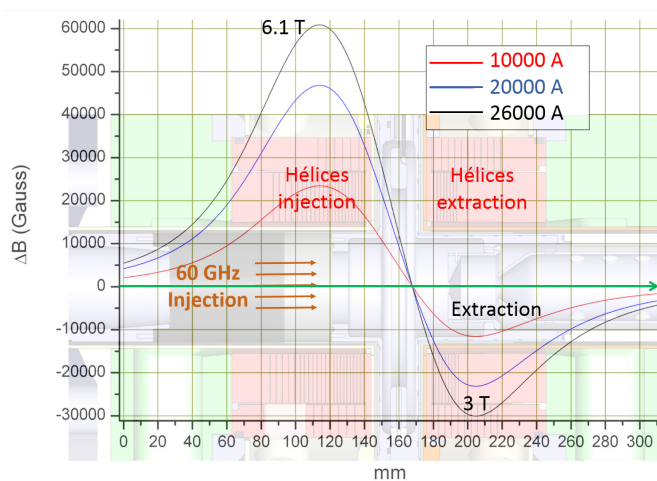


Fig. 1 : Vue en coupe du prototype de la source 60 GHz et mesure du champ magnétique axial sur l'axe.

Le plasma est créé grâce à un gyrotron 60 GHz qui a été spécialement développé par l'IAP-RAS et la société Gycom. Il peut délivrer jusqu'à 300 kW de puissance en mode pulsé (jusqu'à 5 Hz), la durée des pulses peut être réglée de 50  $\mu$ s à 10 ms. Les ondes électromagnétiques sont délivrées en mode quasi optique et sont focalisées au centre de la source. Le faisceau d'ions est extrait à travers un trou d'1 mm de diamètre dans l'électrode plasma, et est accéléré par une différence de potentiel pouvant atteindre 25 kV. Il est ensuite mesuré dans une coupelle de Faraday située en aval d'un spectromètre magnétique permettant la sélection des faisceaux d'une charge et masse données. La figure 2 (gauche) montre un spectre d'ions oxygène en fonction du temps, le point remarquable est la présence d'ions multichargés jusqu'à la charge 5 indiquant un confinement du plasma pendant le pulse HF. Sur la figure 2 (droite) est représenté le pulse d'ions  $O^{3+}$  pour différentes tensions d'extraction. On remarque la présence d'un pic d'afterglow suite à la coupure de la puissance HF, ce qui témoigne à nouveau d'un bon confinement du plasma. Enfin la densité d'ions mesurée dans le faisceau d'ions analysé ( $O^{3+}$ ) atteint 140 mA/cm<sup>2</sup> (1,1 mA). Les valeurs de la densité du faisceau global extrait de la source dépassent 1 A/cm<sup>2</sup>, ce qui représente plus d'un ordre de grandeur au-dessus des valeurs expérimentales mesurées sur les sources d'ions multichargés de hautes performances.



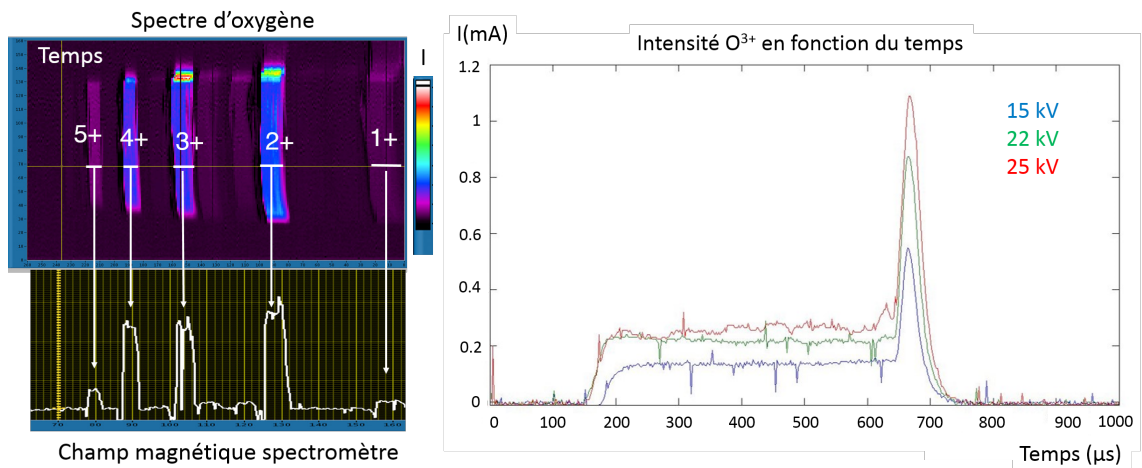


Fig. 2 : Spectre des ions oxygène et intensité de l'O<sup>3+</sup> en fonction du temps.

### Pour en savoir plus

» 60 GHz ECR ion sources, T. Lamy, J. Jacob et al., Invited paper at the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, Yokohama, Japan, September 2015, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HIAT2015/papers/thm2i01.pdf>

# Collaboration EMILIE

J. Angot, L. Bonny, J. Jacob, T. Lamy, P. Sole, T. Thuillier

*In the framework of the EMILIE collaboration, the LPSC performed experimental developments and design studies to optimize the charge breeding technique.*

Sur la période 2014-2015, le LPSC a contribué, sur un plan expérimental, au projet EMILIE<sup>1</sup> et a mené des études pour améliorer la configuration de la source d'ions booster de charges. Cet équipement augmente l'état de charge d'un faisceau d'ions et est un élément clef dans la méthode ISOL pour la production et l'étude d'éléments radioactifs, non disponibles naturellement sur terre.

## Expérimentations

Le LPSC a mis à disposition le banc de tests 1+N+ et a participé aux campagnes expérimentales avec tous les acteurs européens de la collaboration. D'une durée de six semaines, les expériences avaient pour but d'étudier la capture d'un faisceau 1+ injecté dans un plasma de source ECR en fonction de plusieurs paramètres : nature chimique des ions injectés (gazeuse ou alcaline), masse, densité du plasma, etc., ainsi que l'influence de l'utilisation de deux fréquences micro-ondes sur le chauffage du plasma. Le banc de tests nécessaire aux expérimentations est complexe : il met en œuvre deux sources d'ions et deux lignes d'analyse (Fig. 1). Les résultats ont permis de valider les études théoriques, et il a été démontré que le faisceau entrant pouvait servir d'outil de diagnostic du plasma ECR. Ces travaux ont donné lieu à une publication scientifique dans une revue à comité de lecture [1]. Ensuite, de mars à novembre 2015, le LPSC a mis à la disposition de l'équipe projet « upgrade SPIRAL1 » du GANIL, le banc de test 1+N+. L'objectif a été de qualifier leur conception modifiée du booster de charge (de type PHOENIX). Pour permettre cette étude, l'équipe du pôle a démonté une partie du banc de test, participé aux expérimentations, garanti le bon fonctionnement des équipements et enfin remonté la ligne.

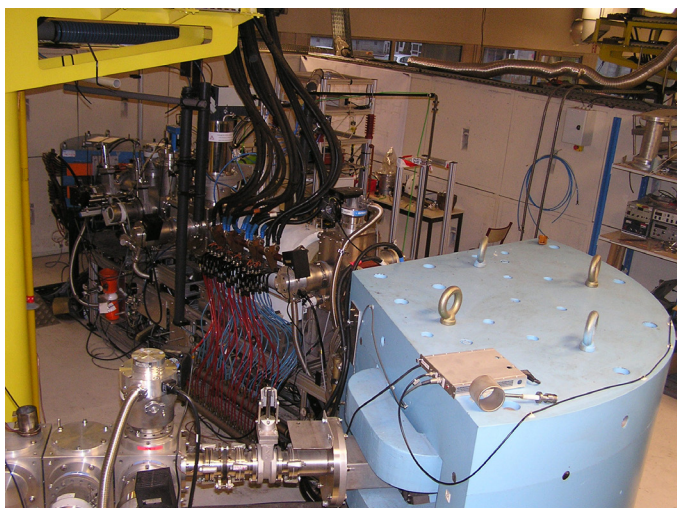


Fig. 1 : banc de tests 1+N+ pour booster de charge.

## Plan de développement du booster de charges

Dans le but d'améliorer le fonctionnement du booster de charges et d'approfondir la compréhension du processus de capture et de multi-ionisation, le pôle accélérateur et sources d'ions a défini un plan de développement basé sur une modification de la structure magnétique.

Une première étape consiste à améliorer le confinement du plasma à l'injection, ainsi que sa stabilité, en ajoutant une pièce en fer doux pour augmenter le champ magnétique. Les simulations ont été effectuées et les pièces sont en cours de fabrication. La structure magnétique hexapolaire de la source sera ensuite remplacée pour améliorer le confinement radial du plasma.

Ces deux premières étapes seront mises en œuvre courant 2016 et de nouvelles campagnes d'expérimentations seront effectuées.

### Pour en savoir plus

» [1] *Injected 1+ ion beam as a diagnostics tool of charge breeder ECR ion source plasmas*, O. Tarvainen, T. Lamy, J. Angot, T. Thuillier, P. Delahaye, L. Maunoury, J. Choinski, L. Standylo, A. Galata, G. Patti, H. Koivisto, *Plasma Sources Science and technology* 24 (2015) 035014

<sup>1</sup> Enhanced Multi-Ionization of short-Lived Isotopes at EURISOL

# La Ligne Basse Énergie pour le projet MYRRHA

M. Baylac, F. Bouly, T. Cabanel, J.-M. De Conto, E. Froidefond, Y. Gómez Martínez, E. Labussière, S. Rey  
D. Bondoux, D. Fombaron, C. Fourel, C. Geraci, J. Giraud, J.-C. Malacour, S. Roudier (Service Études et Réalisations Mécaniques)  
R. Faure, O. Zimmermann (Service Détecteurs et Instrumentation)

*The MYRRHA project aims at the construction of a new research reactor in Mol (Belgium) to demonstrate the transmutation feasibility with an Accelerator Driven System (ADS). The facility requires a proton flux with a maximum power of 2.4 MW (600 MeV - 4 mA). The beam will be delivered by a linear accelerator (linac) which must fulfil very stringent reliability requirements to ensure the reliable ADS operation. It is therefore necessary to carry out prototyping of the main accelerator elements in order to optimise its operation. In this purpose, the Low Energy Beam Transport line has been built and is presently installed and operated at LPSC. An experimental program is in progress to optimise the beam transport and to study the space charge compensation mechanism.*

## Projet MYRRHA et enjeux pour son accélérateur

Initié par le SCK-CEN<sup>1</sup>, le projet MYRRHA<sup>2</sup> vise la construction d'un réacteur hybride (ou ADS pour Accelerator Driven system) de recherche, à Mol en Belgique, afin d'étudier la transmutation de certains déchets nucléaires. Il requiert un accélérateur linéaire de haute énergie (600 MeV) fournissant un faisceau continu d'intensité élevée (4 mA). Cet accélérateur doit atteindre un niveau de fiabilité unique au monde : moins de 10 arrêts faisceau de durée supérieure à 3 secondes par cycle opératoire de 3 mois. Pour atteindre cet objectif, il est absolument nécessaire de s'assurer de la bonne qualité du faisceau en sortie d'injecteur afin de limiter les pertes dans la suite de l'accélérateur. Dans ce but, nous avons, au LPSC, construit et installé la ligne basse énergie (LBE) de l'injecteur (c'est-à-dire les premiers mètres de l'accélérateur de MYRRHA), ceci afin de mener des études expérimentales pour étudier le phénomène de compensation de la charge d'espace et optimiser le transport du faisceau.

## La LBE au LPSC : construction et description

La construction de la ligne s'est achevée au laboratoire en 2015. Une vue de la LBE complète est présentée en figure 1. Le développement et la construction de la LBE ont été financés par le SCK-CEN et aussi par le projet européen MARISA<sup>3</sup>. Depuis 2015, les études expérimentales sont financées par le projet MYRTE<sup>4</sup>.

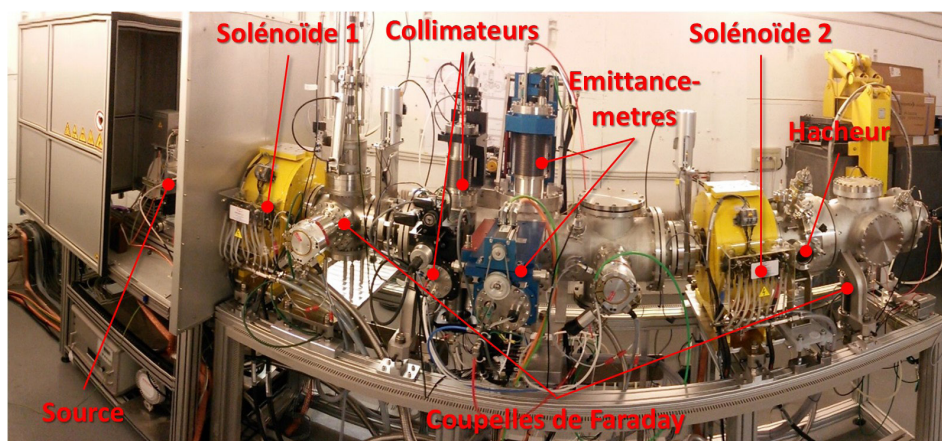


Fig. 1 : La LBE de MYRRHA installée au LPSC.

La source, fournie par l'entreprise Pantechnik, permet de générer un faisceau de protons de ~20 mA. Deux solénoïdes permettent de focaliser le faisceau en sortie de source et en fin de ligne. Ils ont été fabriqués par l'entreprise Sigmaphi, suivant les calculs de dimensionnement magnétique réalisés par

1 Studiecentrum voor Kernenergie - Centre d'Étude de l'énergie Nucléaire, <https://www.sckcen.be/>

2 Multi-purpose hYbrid research Reactor for High-tech Applications, <http://myrrha.sckcen.be>

3 MYRRHA Research Infrastructure Support Action, funded by the European Atomic Energy Community's 7th Framework Programme (FP7-Fission-2013) under grant agreement N°605318

4 MYRRHA Research and Transmutation Endeavour, funded by the European Atomic Energy Community's H2020 Programme under grant agreement n°662186 (MYRTE project)

le pôle accélérateurs et sources d'ions. Un système constitué de quatre collimateurs individuellement motorisés permet d'intercepter une partie du faisceau, notamment pour nettoyer celui-ci des éléments  $H^{2+}$  et  $H^{3+}$  extraits de la source. Des déviateurs magnétiques sont insérés à l'intérieur des solénoïdes afin d'ajuster la position transverse du faisceau. En fin de la ligne de faisceau, un hacheur électrostatique permet de dévier les protons dans un arrêt de faisceau refroidi afin d'effectuer des interruptions temporelles dans le faisceau. Cette structure temporelle est requise afin de contrôler la sous-criticité de l'ADS et de réguler l'intensité moyenne du faisceau dans l'accélérateur. Deux émittancemètres sont utilisés pour mesurer l'émittance du faisceau, et donc pour caractériser sa taille et sa divergence dans les plans horizontaux et verticaux (exemple : cf. figure 2). Deux coupelles de Faraday servent à mesurer le courant du faisceau par interception de celui-ci. Nous avons aussi entrepris le développement d'un profileur à fil (financé par MYRTE et le programme NEEDS<sup>1</sup>). Ce diagnostic, qui permettra de mesurer le profil transverse du faisceau, a l'avantage d'être très peu interceptif et donc de ne pas perturber le fonctionnement de l'accélérateur.

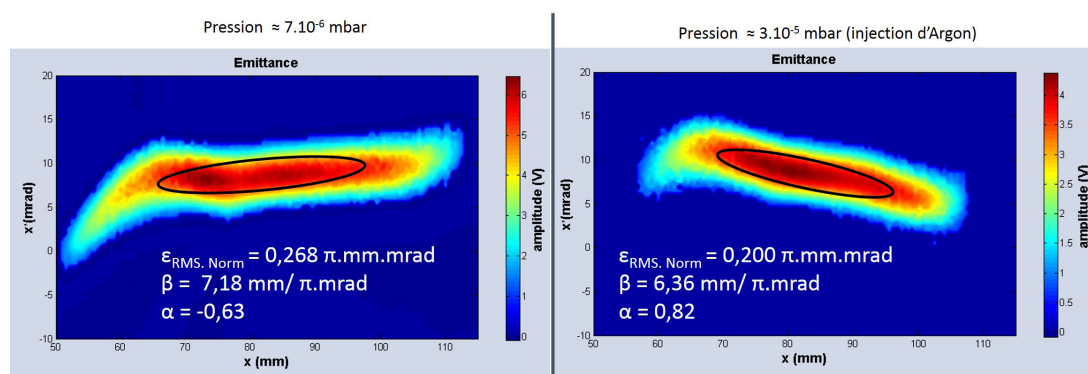


Fig. 2 : Mesures de l'influence de la charge d'espace sur l'émittance du faisceau ( $I_{protons} \approx 7$  mA) par injection de gaz.

### Premiers résultats et compensation de la charge d'espace

La première partie du programme expérimental, réalisée en 2015, consistait dans un premier temps à optimiser le fonctionnement de la source. Ceci a été réalisé au fur et à mesure que la construction de la LBE se terminait. Une fois les réglages de la source optimisés, nous avons mené une campagne de mesures systématiques afin d'évaluer l'influence du champ magnétique du solénoïde et surtout celle de la pression et du type de gaz résiduel dans la LBE, c'est-à-dire l'effet sur la compensation de la charge d'espace (CE). En effet, à basse énergie cinétique la dynamique du faisceau est dominée par des effets non-linéaires du champ de CE généré par le faisceau de particules sur lui-même. Ce champ a un effet dé-focalisant sur le faisceau et il peut être à l'origine de la formation d'un halo engendrant la perte de particules à sa périphérie. Toutefois, en présence d'un gaz résiduel, le faisceau peut ioniser celui-ci, créant ainsi des paires ions/électrons. Les particules secondaires ainsi créées sont alors soit piégées (cas des électrons pour un faisceau de protons), soit repoussées par le faisceau, selon leur charge. Ainsi, la charge globale vue par le faisceau diminue et l'effet dé-focalisant de la CE est minimisé. Nous avons observé expérimentalement cet effet en mesurant l'émittance avec et sans injection de gaz résiduel dans la chambre à vide de la LBE. Deux mesures de la densité de particules du faisceau dans l'espace des phases du plan horizontal sont présentées en figure 2 (abscisses : position x en mm, ordonnées : angle de propagation des particules x' en mrad). Pour une force de focalisation du solénoïde identique dans les deux cas, on constate que l'émittance du faisceau est plus petite lorsqu'on injecte de l'argon dans la ligne ( $P \approx 3 \cdot 10^{-5}$  mbar). De plus, la distribution apparaît moins « distordue » dans le cas où l'on injecte du gaz (figure 2 (droite)), la compensation de la CE est augmentée. Le faisceau est plus compact et donc moins soumis aux non-linéarités du champ magnétique qui augmentent lorsqu'on s'écarte du centre du solénoïde.

Notre objectif est de terminer le « commissioning » de la LBE, afin d'optimiser la transmission du faisceau tout en ayant les caractéristiques escomptées en sortie de ligne (taille et divergence). Il est ensuite prévu que la LBE soit transportée en Belgique, fin 2016, afin de la coupler avec la suite de l'injecteur de MYRRHA : le Quadripôle Radiofréquence (RFQ).

<sup>1</sup> Nucléaire, énergie, environnement, déchets, société - programme français interdisciplinaire sur le nucléaire

### **Pour en savoir plus**

- » *Design progress of the MYRRHA Low Energy Beam Line*, R. Salemmé, F. Bouly et al., Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2014/papers/mopp137.pdf>
- » *Reliability and Fault-tolerance strategy in the MYRRHA superconducting Linac*, F. Bouly et al., Accelerator Reliability Workshop, Knoxville, Tennessee, USA, <http://neutrons-old.ornl.gov/conf/arw2015/presentations.shtml>

# Autres Projets et Activités de Recherche et Développement

*Three additional activities are lead at LPSC. First, we are involved in the JEDI project, which aims to measure the Electric Dipolar Moment of hadrons like protons, deuterons, or even helions up to  $10^{-29}$  e.cm, by using high precision magnetic/electrostatic storage rings. A dedicated study for the analysis magnet of the PEPPo experiment was carried out. And finally, dedicated studies on the multipacting phenomena are in progress.*

## Mesures de moments électriques dipolaires hadroniques

*P. Boge, J.-M. De Conto, Y. Gómez Martínez*

Le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions a rejoint la collaboration JEDI (Jülich Electric Dipole Moment Investigation) sur la mesure de moments électriques dipolaires hadroniques du proton, du deuton ou encore de l'hélium. L'objectif est de gagner 3 ordres de grandeurs sur les mesures actuelles, et atteindre jusqu'à  $10^{-29}$  e.cm. La découverte d'un moment dipolaire non nul aurait un impact majeur sur le modèle standard. Si, au contraire, il s'avérait en dessous de cette limite, cela contraindrait fortement les extensions de ce même modèle standard.

La mesure sur un anneau de stockage possédant des parties déflectrices non plus magnétiques comme sur les synchrotrons classiques, mais électrostatiques. Le faisceau injecté serait polarisé longitudinalement et devrait circuler pendant environ 1000 secondes. L'existence d'un moment électrique dipolaire non nul conduirait, par précession, à la création d'une composante verticale de polarisation que l'on pourrait mesurer.

Les enjeux majeurs de ce type de machine sont la compensation des erreurs systématiques et la préservation de la polarisation pendant le temps de stockage. À ce dernier égard, le nombre d'onde de précession du spin doit être préservé dans la machine. Ceci implique, pour le concepteur, une indépendance de ce nombre d'onde vis-à-vis de la dispersion en énergie du faisceau, mais aussi de sa trajectoire. Les fonctions habituelles de chromaticité et de longueur de trajectoire doivent être considérées dans ce sens.

Le laboratoire est impliqué dans la définition des systèmes de déflexion électrostatiques. Ceci comporte la définition des électrodes et le calcul précis du champ, notamment de fuite, qui a une incidence notable sur la polarisation. Les modèles de champs devront alors être inclus dans les modèles de transport de faisceau et de spin, afin de pouvoir étudier, analytiquement et par simulation, quelles sont les aberrations de nombre d'onde de spin. Les enjeux, notamment en termes d'erreurs systématiques, sont tels que la précision des études doit être considérable.

### **Pour en savoir plus**

» Site de la collaboration : <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/>

## Étude de l'aimant d'analyse pour l'expérience PEPPo

*E. Froidefond*

*E. Voutier (Groupe J-Lab)*

L'expérience PEPPo<sup>1</sup> a démontré la possibilité de produire des positrons polarisés à partir d'un faisceau d'électrons polarisés. La modélisation du phénomène complet nécessite de bien connaître le champ magnétique dans le noyau d'acier situé au centre de l'aimant d'analyse (Figure 1). Ce dernier est en fait un solénoïde blindé par une épaisse carapace d'acier, la culasse. Cette culasse en acier 1010 se prolonge sur l'axe du solénoïde par un noyau d'acier au sein duquel les photons générés dans la cible de conversion sont polarisés. Un anneau de plomb permet de collimater ces photons vers un ensemble de détecteurs photomultiplicateurs.

Le taux de polarisation des positrons est fonction du champ magnétique dans ce noyau d'acier. Le champ est uniforme mais décroît à l'approche de la surface du noyau. La modélisation du champ ma-

<sup>1</sup> Polarized Electrons for Polarized Positrons

gnétique a nécessité dans un premier temps une intense recherche sur les caractéristiques magnétiques de l'acier. En effet, la perméabilité  $\mu$  d'un lot d'acier peut varier énormément. Lorsqu'une mesure au perméamètre n'est pas disponible, la seule référence est une donnée standard. La perméabilité est caractérisée par une courbe dite BH, issue de  $B=\mu H$ , établie grâce à un perméamètre. En l'absence de cette courbe, un ajustement théorique d'une courbe standard est nécessaire. Le logiciel de modélisation électromagnétique OPERA permet d'ajuster la courbe BH et de reproduire le signal  $V(t)$  mesuré expérimentalement. Le modèle tient également compte des courants de Foucault produits lors de la montée en courant. Dans le cas de PEPPo, la rampe en courant s'étale sur 6 s ce qui limite les courants de Foucault. Sans cette modélisation, ne connaissant pas exactement la courbe BH, le champ déduit de la courbe standard de l'acier 1010 ne correspondrait pas à celui déduit de  $V(t)$ . Le taux de polarisation des positrons est fonction de la magnétisation. Ainsi, le modèle fournit une cartographie du taux de polarisation dans le noyau d'acier.

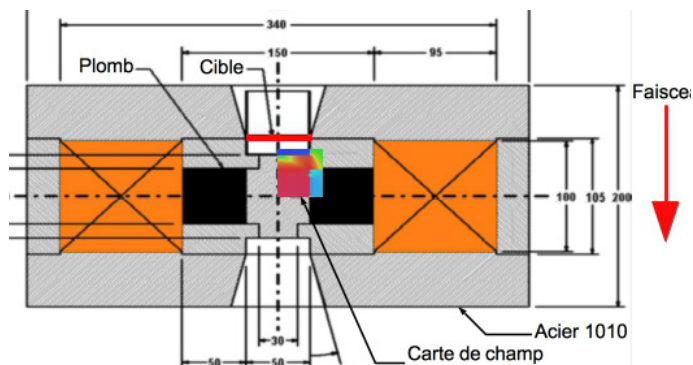


Fig. 1 : Vue en coupe de l'aimant d'analyse de PEPPo.

## Étude Radiofréquence et multipacting

P. Boge, F. Bouly, J.-M. De Conto, Y. Gómez Martínez

Depuis 2014, le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions mène une activité R&D spécifique pour la compréhension du phénomène « multipactor ».

Le multipactor est un phénomène parasite résonant, intervenant dans les structures sous vide soumises à une onde électromagnétique.

Son mécanisme d'apparition en cascade est le suivant :

- Un électron primaire présent dans la structure sous vide est accéléré par le champ électrique.
- Cet électron heurte la surface, produisant des électrons secondaires qui pourront à leur tour être accélérés par le champ électrique.
- Si des conditions précises sont vérifiées (synchronisme avec le champ, taux de production supérieur à un, etc.), le phénomène s'auto-amplifie par résonance.

C'est un mécanisme très complexe qui fait intervenir de nombreux paramètres physiques (coefficient d'émission secondaire, état de surface, structure des matériaux...) et il est extrêmement difficile à prédire. Il existe des remèdes empiriques pour s'en affranchir partiellement dans des structures particulières, et des codes de calcul qui peuvent le prédire mais qui dépendent totalement du choix des valeurs des paramètres physiques introduits.

Ce phénomène apparaît dans les cavités accélératrices et les coupleurs radiofréquence. La désadaptation d'impédance qu'il crée empêche l'injection de la puissance radiofréquence qui est alors réfléchi. Il peut également causer la rupture des céramiques des coupleurs et créer des fuites. Le problème est traité en général, nous l'avons dit, de manière assez empirique. Un code de calcul tridimensionnel a été développé à l'IN2P3 (IPN d'Orsay). Nous avons de notre part, de façon complémentaire, proposé un banc expérimental. Sa structure coaxiale ajustable, permettra de travailler à divers niveaux de champ et sur une gamme 100 MHz - 1 GHz, afin de tester des modèles et de tester le code de calcul. Le banc est en cours de réception de composants, pour un montage et une campagne de mesures envisagés courant 2016.

### Pour en savoir plus

» *State of or and R&D plans on multipacting*, Y. Gómez et al., *Accelerators for ADS workshop*, CERN, Switzerland, 2014, <http://indico.cern.ch/event/300409/session/2/contribution/23>

# Plasmas-Matériaux-Nanostructures

P. Baële, S. Béchu, J. Bentounes, A. Bès, L. Bonny, A. Lacoste, T. Le Coz, I. Iliescu, C. Prahoveanu, A. Todoran  
E. Perbet, S. Roni, S. Roudier (Service Études et Réalisations Mécaniques)  
G. Marcotte, D. Toures (Service Électronique)

*The main research axes of CRPMN are the development of innovative plasma technologies and their applications in different fields such as: surface processing, synthesis of new materials adapted to emerging technologies in the energy field (hydrogen storage, energy conversion) or new detector technologies, negative hydrogen ion production (ITER project). In the domain of plasma sources, the group activities are based on the concept of the distributed microwave plasmas, particularly well suited to the scaling-up of plasma processing. The physical and numerical modeling of the elementary plasma sources, study of new plasma source designs and extension of operating conditions for higher process flexibility are the main objectives of CRPMN.*

L'activité de recherche du groupe Plasmas-Matériaux-Nanostructures porte sur des aspects fondamentaux et technologiques des plasmas micro-onde allant de la conception, l'étude et le développement de sources unitaires, jusqu'à la mise en œuvre des réacteurs et des procédés plasma. Elle est structurée autour de deux principaux axes : 1) conception et étude des sources plasma entretenues par micro-ondes ; 2) applications des plasmas aux procédés en volume et sur surface. Ces activités sont menées en collaboration avec des partenaires académiques comme par exemple, l'Université de Patras, l'Institut Topchiev de Moscou, l'École Polytechnique de Lausanne, pour l'activité développée autour de la production d'hydrogène, l'Université de Montréal et l'INRS de Varenne (Québec) pour les technologies plasma et procédés sur grande surface (LIA-STEP). Le groupe apporte également des compétences et savoir-faire complémentaires dans des projets collaboratifs menés en partenariat avec différents groupes de recherche LPCI, LPGP, CEA-IRFM, ESRF. Les projets à vocation applicative ont été conduits en partenariat avec des industriels comme, par exemple, Valeo, Ugitech, Thales, IREIS.

## Physique et ingénierie des plasmas micro-onde

Ce volet couvre aussi bien la physique et l'ingénierie des réacteurs plasma, que les méthodes et techniques de diagnostic associées. En ce qui concerne les réacteurs plasma, il s'agit d'une technologie propre au LPSC qui vise principalement l'extension d'échelle des procédés par la répartition spatiale (sur surface ou en volume) des sources plasma élémentaires. L'activité de recherche est essentiellement centrée sur l'évolution et le perfectionnement continus de ces sources élémentaires en vue de l'extension du domaine opératoire (pression, fréquence) et de l'optimisation de l'efficacité énergétique, du générateur de micro-ondes jusqu'à l'applicateur d'onde utilisé pour la transmission et la production du plasma. Ainsi, suivant les applications visées, plusieurs types de sources élémentaires ont été développés pour aboutir à une configuration capable d'opérer sur un domaine de 4 décades en pression. Outre les avantages procurés au niveau des applications, ce type de source a permis l'étude par deux approches (expérimentation et modélisation) des modes de couplage de l'onde électromagnétique avec les électrons et la mise en relation du couplage avec le comportement global du plasma à travers son impédance. Aussi, il a été mis en évidence que le caractère capacitif ou inductif du couplage est étroitement aux dimensions de la gaine principalement fixée par la géométrie du système d'injection de l'onde et la fréquence de celle-ci. Cette étude fondamentale a également permis d'identifier, selon la puissance injectée dans le plasma, différents modes de propagation de l'onde dans le plasma (électromagnétique ou électrostatique), ainsi que les mécanismes d'absorption de puissance par les électrons dans un plasma magnétisé à très basse pression.

Pour la détermination de l'impédance du plasma (dissociée du système de transmission de l'onde au plasma), deux techniques ont été développées sur un banc de mesures mis en œuvre au LPSC. La connaissance avec précision de l'impédance du plasma est en effet essentielle pour la conception d'applicateurs d'onde avec une transmission maximale de puissance (du générateur jusqu'à la décharge) sur des fenêtres opératoires prédéfinies par les applications visées. Cette approche a été appliquée pour le développement d'une source plasma très basse pression dédiée au dépôt industriel de DLC (FUI – GMP DLC<sup>2</sup> 2013-2017).



Tout particulièrement, l'influence de la fréquence de l'onde (352 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz) a été étudiée pour valider l'expansion spatiale du plasma (figure 1), et ce, jusqu'à des pressions intermédiaires de quelques dizaines de Torr. Les résultats obtenus présentent une importance majeure en vue de l'obtention de l'uniformité du plasma sur grandes surfaces, notamment dans un domaine de pressions ( $p > 1$  Torr) requises pour des procédés à grande vitesse ou grande cadence de fabrication.



Fig. 1 : Plasma d'argon (Ar, 5 Torr) obtenu par une source micro-onde élémentaire à 352 MHz pour une puissance de 70 W.

La spécificité des sources plasma développées au sein du groupe réside dans la séparation des fonctions : production du plasma et paramètres d'interaction plasma-surface. Ceci est d'une importance déterminante, aussi bien au niveau de la flexibilité opératoire dans les applications nécessitant une maîtrise parfaite des paramètres de procédés (e.g. flux et énergie de bombardement), comme celles d'élaboration de matériaux, qu'au niveau des études fondamentales qui peuvent être effectuées de manière paramétrique. Ces avantages sont mis à profit pour l'étude des mécanismes de production de différentes espèces dans les plasmas d'hydrogène. À titre d'exemple, la production de molécules sur le niveau ro-vibrationnel  $H_2^*(v'' > 5, J'')$  – responsables de la production en surface d'ions négatifs  $H^-$  – a pu être mise en évidence et étudiée en fonction de la nature et de la température du matériau en contact avec le plasma. Cette étude est conduite, à différents niveaux, en collaboration avec le CEA-IRFM dans le cadre du programme EUROfusion, le groupe Physico-chimie des Plasmas de l'Institut Topchiev et l'Université de Patras (thèse en cotutelle).

Avec son expertise et son savoir-faire, le groupe contribue à des projets qui couvrent un domaine plus large que celui des décharges micro-onde. Ainsi, en collaboration avec le LMGP et le ESRF, le plasma produit par un rayonnement synchrotron est, pour la première fois, en cours de modélisation et de caractérisation (Figure 2) par différentes techniques (sonde de Langmuir, spectroscopie d'émission et d'absorption, interférométrie) avec pour objectif de pouvoir décrire (de manière quantitative) et prédire l'absorption de puissance du faisceau de rayons X par le gaz atténuateur.

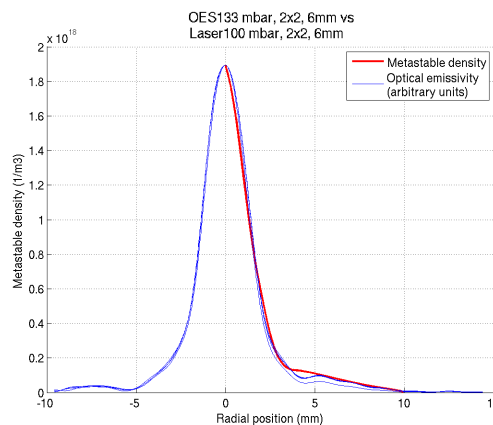


Fig. 2 : Profil du plasma produit par un faisceau de rayons X sur la ligne D17.

## Physique et ingénierie des matériaux en couches minces

La flexibilité que confère la technologie plasma développée au LPSC permet d'envisager et de mettre en œuvre des procédés d'élaboration des matériaux complexes de composition et de structure contrôlées. C'est le cas, en particulier, des matériaux fonctionnels pour le stockage et la conversion d'énergie, ou encore pour des films intégrés dans les technologies de détecteurs ou de nouveaux radiateurs intelligents (Smart Radiator Devices, SRDs).

De manière générale, le contrôle des paramètres de procédés (flux d'énergie et température du substrat) est essentiel, d'une part, pour l'élaboration d'un matériau complexe (binaire, ternaire...) de composition déterminée et, d'autre part, pour l'étude des conditions requises pour l'obtention sélective de différentes phases. La pulvérisation (réactive ou non) assistée par plasma multi-dipolaire constitue un outil parfait pour l'élaboration des composés en films minces et pour l'étude paramétrique du procédé corrélé aux propriétés structurales des films. Ainsi, l'étude de différents matériaux fonctionnels a été réalisée dans le cadre des projets consacrés aux: i) matériaux thermoélectriques à base de magnésium (thèse / Valeo) ; ii) hydrures complexes à base de magnésium (post-doc / CARNOT - Athos) ; iii) composés à changement de phase (LIA-STEP conduit en ANR-PRCI) ; iv) contacts électriques sur diamant monocristallin (ANR blanc-MONODIAM) ; v) films en multicouches pour l'imagerie neutronique de haute résolution.

Parmi les principales réalisations, on peut noter i) l'identification des matériaux candidats pour l'obtention des films barrière à la diffusion entre un dispositif thermoélectrique et son électrode de contact ; ii) la détermination du domaine de stabilité d'un composé thermoélectrique ternaire (Mg-Si-Sn) ; iii) l'évaluation de la limite de solubilité d'un élément dopant dans ce même composé. Dans le domaine des détecteurs, une réalisation importante concerne la croissance séquentielle du bore et des interfaces directement sur le CCD de comptage de neutrons ultra-froids (figure 3), ou encore la réalisation des contacts métalliques sur des détecteurs à diamant, et ce, sans film d'interface et avec des métaux moins onéreux (Al, Cu, In) que celui qui est habituellement utilisé (Au).

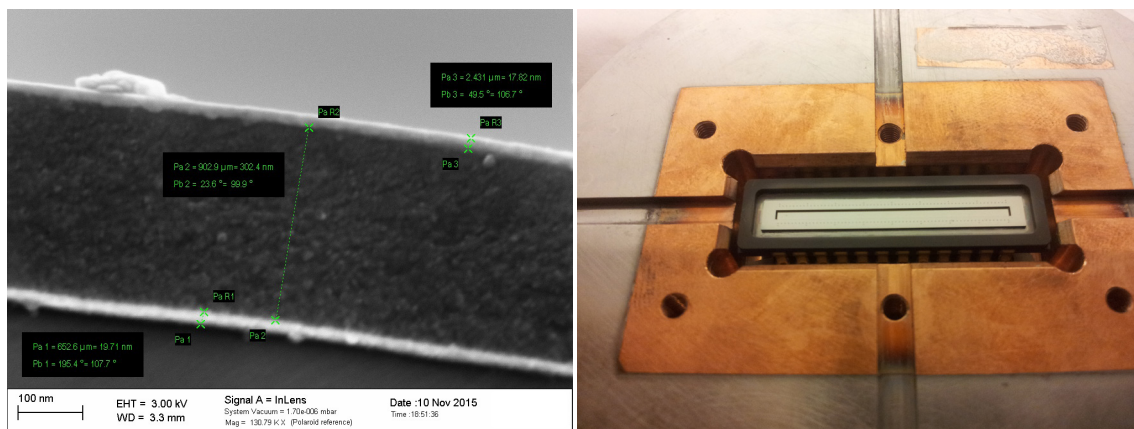


Fig. 3 : Dépôt de Ni/<sup>10</sup>B/Ti par pulvérisation assistée par plasma multi-dipolaire réalisé sur le détecteur CCD (droite).

### Pour en savoir plus

- » *Open-ended coaxial plasma source with extended operating parameters: plasma impedance, coupling and energy efficiency*, P. Baële, S. Béchu, A. Bès, J. Pelletier, A. Lacoste, *Plasma Sources Sci. and Tech.*, PSST 23 (2014) 064006, <http://www.ingentaconnect.com/content/iop/psst/2014/00000023/00000006/art064006>
- » *Investigation of Mg<sub>2</sub>(Si,Sn) thin films for integrated thermoelectric devices*, C. Prahoveanu, A. Lacoste, S. Béchu, C. de Vault, K. Azzouz, L. Laversenne, *Journal of Alloys and Compounds (JALCOM)*, 649 (2015), pp 573–578 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815304400>
- » *Diamond sensors for future high energy experiments*, M. Artuso, F. Bachmair et al. (A. Bes, A. Lacoste), *Nuclear Instruments and methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216300560>