

4 Accélérateurs, sources d'ions et plasma

Le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions du laboratoire a pour mission de concevoir, réaliser et exploiter des accélérateurs, ou certains de leurs sous-systèmes, pour les pro-grammes de physique. Il est également spécialisé dans le domaine des sources d'ions à la résonance cyclotronique (ECR) avec une large gamme d'applications : sources d'ions lourds multichargés, sources d'amplification d'état de charge (ou boosters de charge), sources miniaturisées. Les activités du Pôle abordent un large spectre des thématiques de recherche du laboratoire : physique nucléaire (neu-tronique, physique des réacteurs, production de faisceaux d'ions radioactifs), physique des accélérateurs (dynamique de faisceau, radiofréquence). La période 2016-2018 a vu plusieurs chantiers majeurs sur les installations : l'installation d'un spectromètre de haute résolution sur le banc de qualification de la source d'ions lourds de SPIRAL2, le renforcement du blindage de la casemate de l'accélérateur GENEPI2, et l'extension de performances de la ligne 1+n+ du booster de charge.

La nouvelle version optimisée de la source d'ions lourds multichargés du projet SPIRAL2 a été développée et qualifiée au LPSC. Elle présente d'excellentes performances, notamment pour la production des ions métalliques. Un programme expérimental important a été mené sur la source booster du LPSC sur son fonctionnement en mode pulsé et sur l'étude des contaminants co-extraits de la source. Il a généré plusieurs publications scientifiques majeures. D'importantes modifications sont actuellement en cours dans le but d'améliorer la source et le banc de caractérisation pour les futures campagnes d'expériences. L'optimisation de la source compacte miniature SUPERCOMIC, exploitant une micro-onde à 5.8 GHz, a permis d'obtenir d'excellentes performances sur le courant de protons extrait à basse puissance injectée. Enfin, l'année 2018 marque la reprise des développements sur le prototype de source d'ions innovante fonctionnant à la fréquence de 60 GHz.

Pour les accélérateurs, la principale contribution concerne les réacteurs nucléaires sous-critiques pilotés par accé-lérateurs (ADS) à différentes échelles. Sur la maquette GUINEVERE exploitée au SCK•CEN¹ en Belgique, un nouveau mode de faisceau a été développé pour simuler au mieux les conditions qui seront réellement rencontrées auprès d'un ADS de puissance. De plus, le LPSC contribue à MYRRHA, projet d'ADS dans la gamme multi-MW. Après avoir construit le premier tronçon de l'accélérateur linéaire de MYRRHA², le laboratoire l'exploité pour étudier les faisceaux de protons intenses de basse énergie. De plus, nous avons effectué différents travaux notamment sur la dynamique des faisceaux, les coupleurs de puissance des cavités accélératrices, le dimensionnement des systèmes de vide ou l'aimant à commutation rapide de l'injecteur, en vue de préparer la construction du linac 100 MeV de MYRRHA, financé par le gouvernement belge.

Depuis 2014, un nouveau programme de R&D dans le domaine de la radiofréquence, a été initié afin d'étudier le multipactor, phénomène parasite potentiellement destructeur pour les structures accélératrices. Un banc de test dédié a été conçu et construit pour effectuer des mesures sur une large gamme de paramètres.

Enfin, des travaux de physique des accélérateurs fondamentale ont été menés dans le cadre des études de faisabilité de la mesure de moments électriques dipolaires hadroniques. Pour ce sujet novateur, il s'agit d'étudier la dynamique des faisceaux polarisés dans un anneau purement électrostatique et en particulier d'étudier l'effet induit des déflecteurs électrostatiques.

L'activité de recherche de l'équipe 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 plasma unitaires, jusqu'à la mise en œuvre de réacteurs et de procédés par plasma. Elle est structurée autour de deux principaux axes : 1) conception et étude de sources plasma 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, l'Université de Mostaganem (pour l'activité développée autour de la production d'hydrogène, EURO-Fusion), l'Université de Montréal et l'INRS de Varenne-Québec (pour les technologies plasma et procédés sur grande surface LIA-STEP,

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>

Carnot-Énergies du futur, GDRI-NMC). L'équipe apporte également des compétences et savoir-faire complémentaires dans des projets collaboratifs menés en partenariat avec différents groupes de recherche de : IMMM (UMR6823), LPGP (UMR8578), CEA-IRFM, ESRF, ICMPE (UMR7182). Les projets à vocation applicative ont été conduits en partenariat avec des industriels comme, par exemple, Valeo, Ugitech, Thales, IREIS.

4.1 Pôle accélérateur et sources d'ions

Membres permanents du pôle :

J. Angot, M. Baylac, L. Bonny, F. Bouly, D. Bondoux, T. Cabanel, J.-M. De Conto, E. Froidefond, Y. Gomez-Martinez, J. Jacob, E. Labussière, M. Migliore, S. Rey, P. Sole, T. Thuillier

Doctorants, postdoc et CDD du pôle :

T. André (postdoc), B. Bhaskar (doctorant), A. Beller (apprenti), J.-B. Cully (CDD), M. Debongnie (doctorant), P.-O. Dumont (CDD), T. Gmond (CDD), A. Leduc (doctorant), J. Michaud (doctorant)

4.1.1 Exploitation de l'accélérateur GENEPI-3C

M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, E. Labussière, S. Rey
A. Billebaud, S. Chabod (*Groupe Physique des Réacteurs*)
J. Bouvier, D. Tourrés (*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 at the SCK•CEN site in Mol (Belgium). This accelerator delivers beams 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 a mené le développement de l'accélérateur GENEPI-3C pour le programme GUINEVERE. Celui-ci est couplé au réacteur nucléaire rapide VENUS-F, conçu et opéré par le SCK•CEN de Mol en Belgique.

L'accélérateur est exploité depuis son couplage avec le réacteur fin 2011, principalement par le personnel du pôle accélérateurs et sources d'ions, qui a également formé quelques pilotes belges du réacteur à la conduite de l'accélérateur. Depuis leur certification, obtenue début 2016, ces personnels du SCK•CEN sont désormais autonomes pour l'exploitation de l'installation couplée, accélérateur et réacteur, dans des conditions standards. Le LPSC demeure en charge des phases de redémarrage de l'accélérateur qui restent complexes. En octobre 2016, une maintenance complète de la source d'ions a été menée afin d'en améliorer les performances : l'ensemble mécanique formé par la source et les lentilles électrostatiques a été rapatrié au LPSC pour le remplacement des isolants électriques, avant d'être à nouveau installé sur GENEPI-3C en décembre 2016. À la suite de l'observation d'une lente dérive de la mesure de la pression du gaz deutérium utilisé dans la source d'ions, un nouveau type de jauge non sensible à ce gaz a été installé afin de donner une valeur de référence. La machine a été exploitée pour différents programmes expérimentaux sur la période 2016-2018.

Depuis début 2018, l'équipe travaille sur la génération d'interruptions de faisceau aléatoires superposées aux interruptions régulières pour valider les mesures de suivi de la réactivité du réacteur dans des conditions dégradées, potentiellement à l'œuvre sur un ADS de puissance du type MYRRHA. Depuis octobre 2018, l'accélérateur GENEPI-3C est découplé du réacteur et a été mis à l'arrêt temporairement pour l'exploitation du réacteur en mode critique, avant une reprise d'exploitation couplée au printemps 2019.

4.1.2 Accélérateur linéaire pour le projet MYRRHA

M. Baylac, A. Beller, D. Bondoux, F. Bouly, T. Cabanel, M. Debongnie, E. Froidefond, Y. Gómez Martínez, M. Migliore, S. Rey
R. Faure, O. Zimmermann (*Service Détecteurs et Instrumentation*)
J.L. Bouly, J. Bouvier, C. Li, D. Tourrés (*Service Électronique*)
C. Fourel (*Service Études et réalisations Mécaniques*)

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) with very stringent reliability requirements to ensure an efficient ADS operation. LPSC is involved in the phase I of

the project (linac construction up to 100 MeV) through the MYRTE European R&D Program and through a collaboration contract between IN2P3 and SCK•CEN

Le projet MYRRHA et les enjeux pour son accélérateur

Initié par le SCK•CEN, le projet MYRRHA ³ vise la construction d'un réacteur hybride (ou ADS) 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.

En 2018 le gouvernement Belge a annoncé le financement de la phase I du projet : construction du linac jusqu'à 100 MeV et des zones expérimentales associées. À ce titre le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions est aussi bien impliqué dans des études de physique du faisceau que des activités de R&D pour différentes parties de l'accélérateur. Ces contributions s'articulent au sein de deux programmes : le programme européen MYRTE⁴, et un contrat de collaboration entre l'IN2P3 et le SCK•CEN dont le LPSC assure la coordination.

Ligne basse énergie et dynamique du faisceau

Pour atteindre l'objectif de fiabilité de MYRRHA, 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. La ligne basse énergie (LEBT), premier maillon de l'injecteur, joue donc un rôle crucial car elle permet de transporter et de conditionner le faisceau depuis la source de protons vers la suite du linac. La LEBT a été construite et installée au LPSC (cf. Figure 1).

Un programme expérimental a été mené à Grenoble pour optimiser le transport du faisceau dans la LEBT en exploitant notamment le phénomène de compensation de la charge d'espace. À basse énergie cinétique (ici des protons à 30 keV) la dynamique du faisceau est dominée par des effets non-linéaires du champ de charge d'espace généré par le faisceau sur lui-même. Ce champ a un effet dé-focalisant et il peut engendrer des pertes faisceau dans la LEBT, mais aussi dans la suite du linac. Cependant, le faisceau interagit aussi avec le gaz résiduel présent dans la chambre à vide et ionise celui-ci. Les électrons créés sont piégés par le potentiel du faisceau de protons. Ainsi, la charge globale du faisceau est compensée et la charge d'espace partiellement neutralisée. Ce phénomène complexe, difficile à modéliser, a été observé lors des tests de la LEBT, quantifié en fonction de la pression et du type de gaz résiduel, et utilisé pour optimiser la transmission dans la LEBT de MYRRHA (cf. Figure 2).

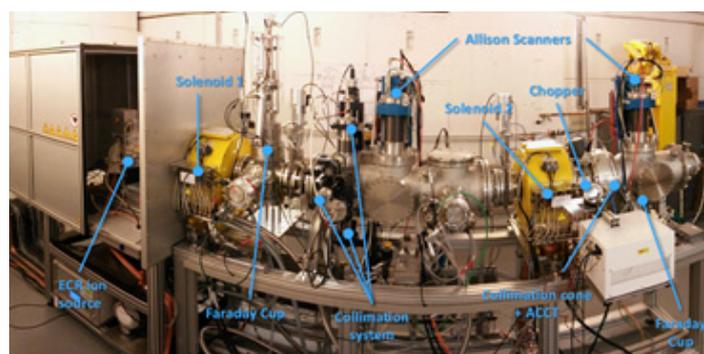


Figure 1 : La LEBT de MYRRHA installée au LPSC (2017).

³

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

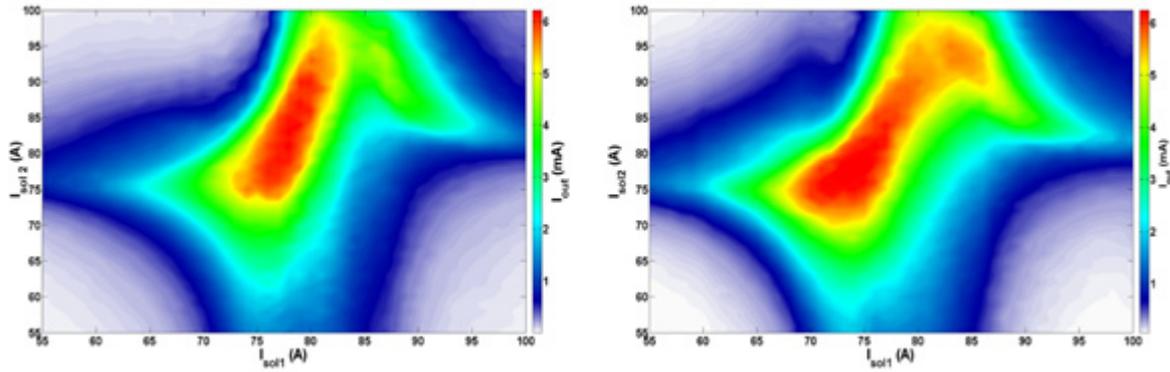


Figure 2 : Cartes de transmission de la LEBT: mesure du courant faisceau en sortie de ligne en fonction de la force de focalisation des deux solénoïdes, i.e. I_{sol1} et I_{sol2} . Carte de gauche : sans injection de gaz dans la ligne, $P = 7.0 \cdot 10^{-6}$ mbar. Carte de droite : avec injection de Krypton dans la ligne, la pression de gaz résiduel est augmentée à une valeur de $P = 2.4 \cdot 10^{-5}$ mbar, la transmission du faisceau est améliorée.

Après son transfert vers la Belgique, la LEBT est en cours de "re-commissioning". Elle sera ensuite couplée à l'élément suivant de l'injecteur : le quadripôle radiofréquence (RFQ).

En collaboration avec l'équipe du SCK•CEN, le Pôle assure la coordination du design global de l'accélérateur et nous avons notamment réalisé l'ensemble des études de dynamique faisceau pour le linac supraconducteur (cf. Figure 3). De plus, nous menons des études spécifiques de physique du faisceau afin de développer des méthodes d'optimisation pour le réglage rapide (en moins de trois secondes) des cavités accélératrices supraconductrices, afin de pallier à la défaillance de l'une d'entre elles. Ces procédures de re-réglage rapide sont un concept unique, développées par l'IN2P3, elles n'ont jusqu'alors jamais été appliquées à un accélérateur. On a démontré que la mise en œuvre de ce schéma de compensation de panne est loin d'être trivial et qu'il peut avoir un impact fort sur la stabilité du faisceau. Enfin, un travail de thèse est mené, et encadré au sein du Pôle, pour la modélisation de la dynamique du faisceau par des méthodes dites de « machine learning ». Ces travaux s'inscrivent d'une part dans la thématique des études de compensation de pannes et d'autre part dans le développement d'une méthode novatrice pour le contrôle et le réglage (rapidité et précision) de l'injecteur de MYRRHA (LEBT+RFQ).

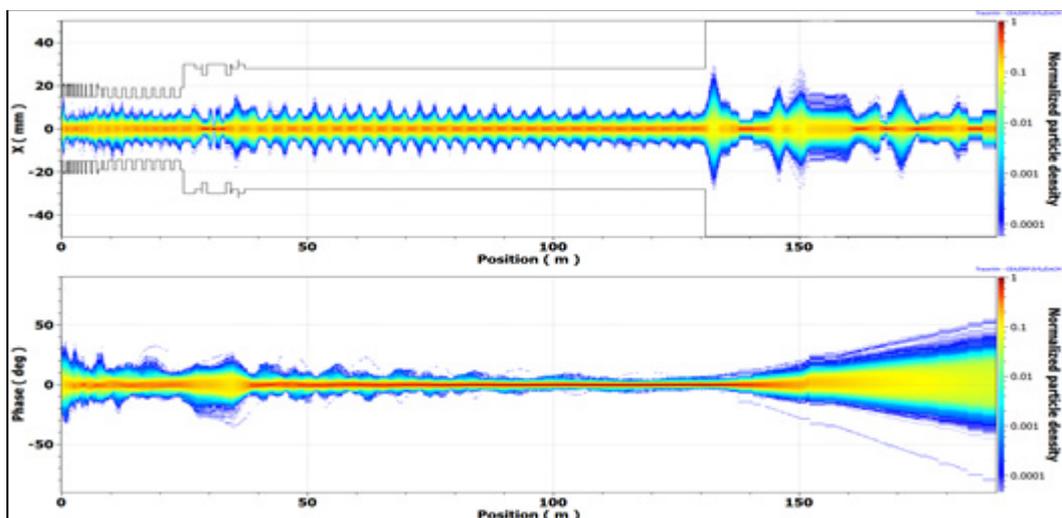


Figure 3 : Évolution de la distribution faisceau (plan horizontal et longitudinal) lors de son accélération dans le linac 100 MeV de MYRRHA Phase I (Sortie RFQ jusqu'à la cible expérimentale).

Dimensionnement des systèmes de vide

Le Pôle réalise le dimensionnement des systèmes de vide du linac 100 MeV. Après avoir réalisé les calculs de conductances et de flux de dégazage, l'accélérateur a été modélisé sous PSpice (logiciel de CAO électronique). Ainsi, en utilisant l'analogie entre l'électronique et le vide, les simulations réalisées sous PSpice ont permis d'établir les courbes de pression attendue le long de l'accélérateur (Figure 4).

Les résultats nous permettent d'orienter et de valider les choix de matériel (pompes, vannes, jauges) et de fournir des préconisations de mise en œuvre pour une bonne qualité du vide dans les différentes sections. Nous rédigeons également les procédures de mise sous vide et d'étuvage.

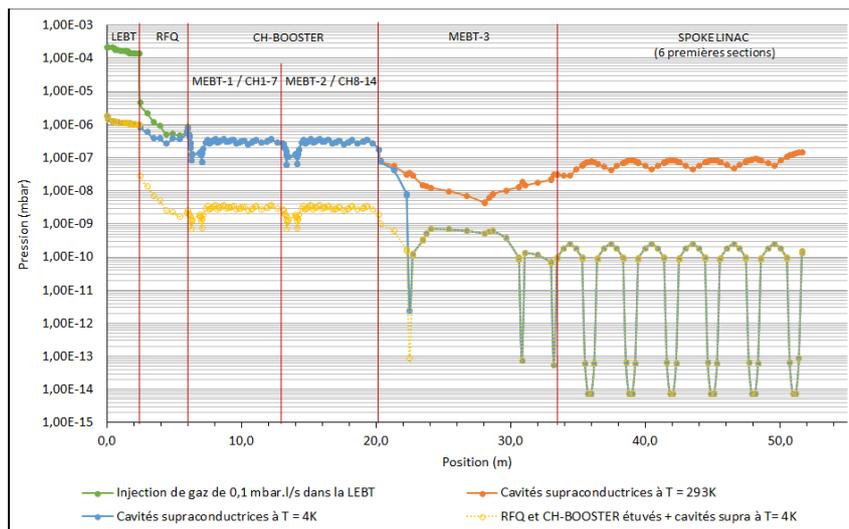


Figure 4 : Courbes de pression au long de l'accélérateur MYRRHA 100 MeV

Aimant à commutation rapide

L'accélérateur de MYRRHA possède deux lignes d'injection distinctes jusqu'à une zone de jonction avant injection d'un seul des deux faisceaux dans l'accélérateur linéaire. Ces deux lignes qui fonctionnent simultanément permettent de parer à la défaillance de l'une d'entre elle dans un délai de 3 secondes (redondance parallèle). Pour cela, un dipôle de commutation permet d'envoyer l'un ou l'autre des faisceaux qui arrivent avec un angle de 45° ou -45° dans l'accélérateur linéaire. Ce dipôle doit donc générer le champ magnétique nominal d'intensité B_0 ou $-B_0$.

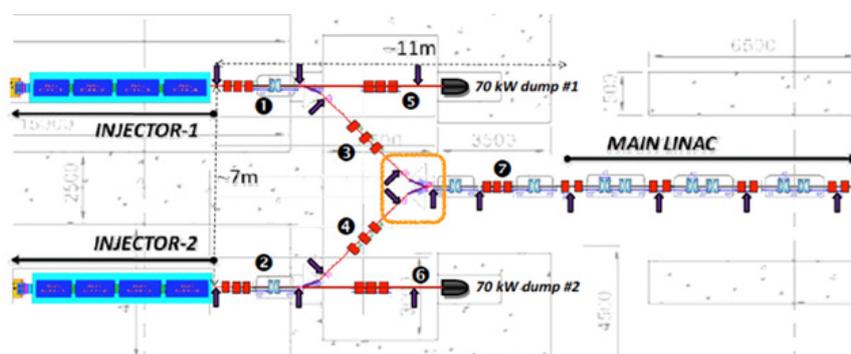


Figure 5 : deux lignes d'injections (gauche) combinées dans la zone de jonction entourée en orange suivies de l'accélérateur linéaire (droite)

Le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions s'est vu confier l'étude de conception du dipôle de commutation situé dans la zone de jonction. Le principe retenu est un dipôle divisé en deux parties : l'une produisant un champ

statique, complétée par une section produisant un champ pulsé. Cette structure permet de minimiser la taille de la partie pulsée, et de réduire ainsi l'importance des problèmes techniques qu'amène la pulsation de champ magnétique.

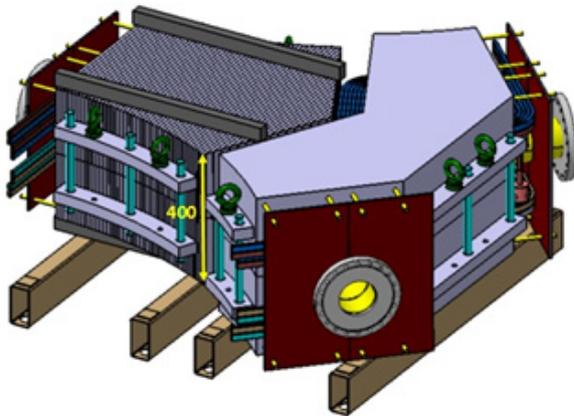


Figure 6 : maquette 3D du dipôle de commutation rapide

Dans la section de l'accélérateur où se trouve le dipôle, les protons ont une énergie de 16 MeV, et donc une rigidité magnétique $B\rho$ de 0,6 T.m. Un rayon de courbure de 1,2 m permet de limiter l'intensité du champ magnétique nominal à 0,5 T.

En adoptant une section de bobine adaptée, il est alors possible de maintenir la densité de courant sous la limite de 9 A/mm² des conducteurs refroidis. L'ensemble pèsera environ 1,3 tonnes, ce qui en fait un objet suffisamment léger pour permettre les réglages en position.

Coupleurs de puissance RF

Le pôle Accélérateurs et Sources d'Ions du LPSC est en charge de la conception et de la fabrication de quatre prototypes de coupleurs de puissance radiofréquence (coupleur RF). Un coupleur RF :

- Permet un transfert de puissance supérieur à 99,7% de l'amplificateur à la cavité accélératrice. La puissance nominale est de 8 kW CW @352.2MHz.
- Le très haut niveau de fiabilité exigé est garanti par la conception basée sur une puissance de 80 kW,
- Assure l'étanchéité entre le vide secondaire de 10⁻⁸ mbar et l'air ambiant
- Compense les efforts liés à la mise sous vide et aux dilatations thermiques (t° cavité : 4,2 K),
- Minimise le transfert de chaleur sur les cavités cryogéniques supraconductrices.
- Début 2018, les études de conception radiofréquence, thermiques et vibratoires ont été achevées et validées en revue de projet IN2P3. Fin 2018, le cahier des charges et les plans pour construction ont été envoyés au SCK-CEN pour le lancement de l'appel d'offre.

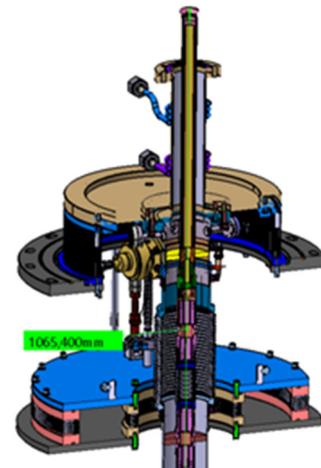


Figure 7 : vue en coupe de l'ensemble coupleur RF conçu par le LPSC

Instrumentation faisceau : « wire scanner »

Le pôle a également conçu, réalisé et testé un diagnostic faisceau à fils, dit "wire scanner". Le rôle de ce diagnostic est de fournir une surveillance du faisceau des protons accélérés par mesure de son profil transversal. Ce type de diagnostic est faiblement interceptif : son utilisation pendant l'exploitation de l'accélérateur est donc envisageable car il ne génère pas de perte faisceau notable.

Par rapport à des réalisations similaires existantes, des solutions technologiques particulières ont été mises en œuvre afin de repousser les limites d'utilisation du diagnostic vers des faisceaux de puissance aussi élevées que possible : maintien en tension des fils de mesure, vitesse de déplacement élevé. Un effort important a également été consacré à l'exploitation des mesures afin de restituer des paramètres faisceau globaux tels que écarts-types et position du centroïde.

Fin 2018 une campagne de mesure sur une ligne de faisceau test de faible puissance a permis de constater le bon fonctionnement de l'appareil et de valider les techniques d'exploitation des mesures. Pour la suite, l'objectif est de tester ce "wire scanner" avec des faisceaux de plus forte puissance.

Système électronique pour le contrôle en fréquence des cavités supraconductrices

Une cavité supraconductrice RF est sensible à diverses perturbations telles que les vibrations mécaniques ou les forces de Lorentz. Ces perturbations produisent un désaccord important de la fréquence de résonance de la cavité. Un système de compensation composé d'éléments piézo-électriques et électroniques (convertisseur analogique-numérique, numérique-analogique, microcontrôleur rapide ...) est alors nécessaire.

Un ensemble de régulation a été conçu et réalisé comprenant deux éléments piézoélectriques, un rack d'électronique de puissance comprenant 2 voies indépendantes ainsi qu'une carte électronique au format μ TCA gérant le système de régulation.

À l'aide de composants de conversion de tension et d'un microcontrôleur rapide la carte est capable de gérer 2 éléments piézoélectriques.

Un FPGA (Field Programmable Gate Array) a été ajouté pour gérer l'interface avec des éléments externes au travers du bus interne du μ TCA et un logiciel dédié a été développé.

4.1.3 Projet R&D Multipactor

T. Cabanel, J.B. Cully, J.-M. De Conto, P.O. Dumont, Y. Gómez Martínez
O. Zimmerman (*Service Détecteurs et Instrumentation*)
P. Boge, N. Emeriaud (*Service Études et Réalisations Mécaniques*)

Multipacting is a parasitic electron avalanche process that may occur in RF devices such as cavities or couplers. As it can be detrimental to the operation of these devices, the accelerator group at LPSC is currently study this phenomenon.

A la suite du retour d'expériences des coupleurs RF de puissance pour le projet SPIRAL2 produits au LPSC (voir rapport d'activité précédent), le Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions a lancé une activité de 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 une surface, produisant des électrons secondaires qui pourront à leur tour être accélérés par le champ électrique ; sous certaines conditions précises (synchronisation avec le champ, taux de production supérieur à un, etc.), le phénomène s'auto-amplifie par résonance. Ce mécanisme, très complexe, fait intervenir de nombreux paramètres physiques (coefficient d'émission secondaire, état de surface, structure des matériaux...) et il est extrêmement difficile à pré-dire. Il peut apparaître 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 sous l'avalanche d'électrons et ainsi rompre l'étanchéité de la structure.

Le LPSC a conçu et réalisé un banc expérimental basé sur une structure coaxiale ajustable, qui permet de travailler à divers niveaux de champ électrique et sur une gamme de fréquence réglable (100 MHz - 1 GHz). Ainsi, il sera possible de tester les modèles empiriques existants et un code de calcul tridimensionnel développé par l'IPN d'Orsay. Les premières campagnes de mesures du multipactor ont été réalisées (Figure 8) amenant à des optimisations de structure.

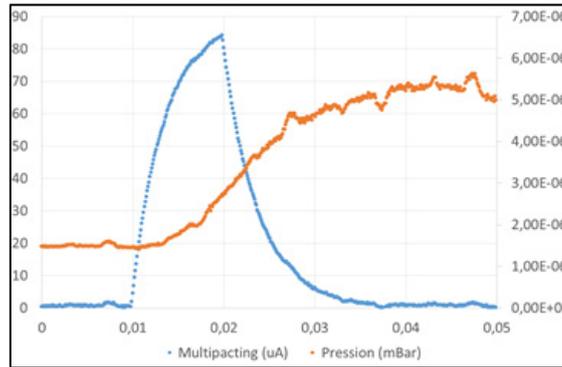


Figure 8 : Mesure du multipactor dans la structure coaxiale résonante.

En 2018, il a été décidé de caractériser également l'efficacité de dépôts métalliques couramment utilisés dans la communauté des accélérateurs pour limiter les effets du multipactor. Une étude de conception a donc démarré pour adapter la structure coaxiale existante de façon à tester différents dépôts « anti-multipactor ».

Enfin, une thèse en collaboration avec la société Thales et un contrat d'apprentissage sont en cours d'élaboration.

4.1.4 Le projet JEDI : Mesure du moment électrique dipolaire de hadrons

J.-M. De Conto, Y. Gómez Martínez, J. Michaud
 Collaboration JEDI (Jülich Electric Dipole Investigation)

The existence of an Electric Dipole Moment for hadrons is a promising way for Physics Beyond the Standard Model. Its very accurate measurement (up to 10^{-29} e.cm) is foreseen on electrostatic storage rings. The LPSC team works on the effect of non-linearities of the electric fields, in particular in the fringe fields.

En 2016, le LPSC a rejoint la collaboration JEDI (Jülich Electric Dipole Investigation) sur la mesure, au moyen d'anneaux de stockage purement électrostatiques, du moment électrique dipolaire de hadrons tels que le proton ou le deuton. L'existence d'un EDM non nul serait une source d'asymétrie matière/antimatière, et contribuerait à l'exploration dite indirecte de la physique au-delà du modèle standard. Le principe de la mesure est basé sur la précession du spin (pour un EDM non nul) dans un champ électrique avec pour objectif ultime des valeurs allant jusqu'à 10^{-29} e.cm. Le scénario prévoit donc, dans sa version de base, un anneau de stockage purement électrostatique (avec des déflecteurs créant un champ horizontal) dans lequel serait injecté un faisceau polarisé longitudinalement. On montre aisément que pour le proton il existe une énergie dite « magique » pour laquelle la précession due au moment magnétique est idéalement nulle.

La collaboration JEDI mène actuellement, en outre, une très importante campagne expérimentale qui permet de valider les méthodes de mesure et de quantifier les performances réellement accessibles.

Pour atteindre les objectifs de précision recherchés, un paramètre important est la durée de vie du faisceau. Plus précisément, la polarisation horizontale doit rester cohérente pendant environ mille secondes. L'une des sources de perte de cohérence est la différence de trajectoires selon les particules, et donc la disparité de l'évolution du spin. Un point important, abordé par le LPSC dans le cadre d'un travail de thèse, est l'effet des champs électriques dans les déflecteurs, que ce soit dans la partie interne (déflecteurs cylindriques, potentiel logarithmique bien connu) que dans les champs de fuite (présence de non linéarités). Les programmes actuels de simulation n'incluent aucun modèle de champ de fuite, si ce n'est une simple forme arbitraire (qui n'inclut donc pas les vraies composantes non-linéaires, notamment hexapolaire, et encore moins les conditions aux limites de potentiel nul).

L'équipe s'est orientée vers une modélisation théorique :

- Pour le calcul des champs de fuite avec tant des formes d'électrodes que des conditions aux limites réalistes. Ceci est obtenu par des jeux de transformations conformes dans le plan complexe que nous avons

déterminées.

- Pour le calcul des trajectoires dans la partie interne du déflecteur et dans le champ de fuite. Nous avons à cet effet développé une approche hamiltonienne perturbative au second ordre.
- Pour le calcul de l'évolution du spin, basé sur l'utilisation de spineurs et, également, de méthodes perturbatives au second ordre.

Pour une condition aux limites donnée (i.e. : position de l'équipotentielle zéro sur l'axe de la trajectoire), des tables numériques universelles sont obtenues, valables pour tout déflecteur (de rayon et distance inter-électrodes quelconques). Elles correspondent à l'intégration des équations du mouvement et du spin, une fois pour toutes, dans un déflecteur normalisé en rayon et distance inter-électrodes. Pour cela l'équipe a également développé des méthodes numériques d'intégration rapides (basées sur des quadratures) spécifiques aux intégrales à calculer.

Ces travaux ont été implémentés dans le code de calcul modulaire BMAD sur un scénario de référence en cours d'étude.

L'approche choisie, analytique et toute intégrée, permet d'un part d'avoir des modèles théoriques intégrant toute la physique de manière maîtrisée (et paramétrable), mais aussi de gagner un temps de calcul considérable : il faut plusieurs jours de calcul pour simuler un anneau, il faudrait des années avec des programmes d'intégration de trajectoire (auxquels se grefferaient de très indésirables dérives numériques).

Les premiers résultats montrent qu'il subsiste des défauts de dérive intrinsèques au code, comme des valeurs propres non-strictement unitaires, mais que le scénario de référence, très simplifié, n'est pas optimal. En termes plus techniques, la maille gagnera certainement à être achromatique (prise en compte du facteur de compression des moments) et il faudra réfléchir également aux inévitables aspects de chromaticité (comme cela a été fait dans le cadre de la troisième référence donnée ci-dessous).

4.1.5 Prospectives du projet 60 GHz

J. Angot, M. Baylac, J. Jacob, T. Lamy, P. Sole, T. Thuillier

New experiments with the 60 GHz SEISM ECR ion source are scheduled for the period 2019-2020. Prospects for the future of the experiment were carried out and it was concluded it is worth gathering an extended international collaboration aiming to design and build an European class 60 GHz ECR ion source. The magnetic structure of such an ion source was studied and the feasibility demonstrated.

Après les expériences menées sur la période de rapport précédente, le projet de recherche sur les sources d'ions à 60 GHz a continué par une étude prospective sur l'avenir de l'activité avec les partenaires historiques, à savoir le LNCMI (CNRS/INP), l'IAP RAS de Nizhny Novgorod (Russie) et l'université de Jyväskylä (Finlande). Un post-doctorant a été embauché fin 2018 pour préparer une nouvelle campagne d'expériences sur la source d'ions SEISM, installée au LNCMI. Une amélioration de la ligne d'analyse de la source est envisagée pour augmenter la portée des futurs résultats. Une étude prospective a été menée en 2017 et 2018 sur l'avenir à long terme de l'expérience. Des synergies possibles ont été identifiées avec différentes thématiques de physique. L'objectif est de développer une expérience ambitieuse au LNCMI utilisant une source d'ions 60 GHz de très grand volume (diamètre de chambre plasma 200 mm, longueur 500 mm), dans laquelle le champ magnétique est généré par un hexapole chaud (évolution de la technologie LNCMI) et des solénoïdes supraconducteurs (collaboration possible avec le CEA/IRFU)⁵. L'accès facilité au plasma RCE dense dans cet instrument sera d'un grand intérêt pour les communautés des physiciens des plasmas, des physiciens atomistes et des astrophysiciens intéressés par les plasmas fortement magnétisés.

⁵ T. Thuillier, D. Bondoux, J. Angot, M. Baylac, E. Froidefond, J. Jacob, T. Lamy, A. Leduc, P. Sole, F. Debray, C. Trophime, V. Skalyga, and I. Izotov, Rev. Sci. Instrum., 89, 052302 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5017113>

4.1.6 Source d'ions PHOENIX V3 pour SPIRAL2

J. Angot, D. Bondoux, L. Bonny, T. Cabanel, J.B. Cully, J. Jacob, A. Leduc, M. Migliore, P. Sole, T. Thuillier
N. Emeriaud, C. Geraci, J. Giraud, D. Grondin, H. Lucas-Henriques, D. Morotti, Y. Odievre, S. Roni, S. Roudier
(Service Études et Réalisations Mécaniques)
E. Tourba (Service Électronique)
O. Zimmerman (Service Détecteurs et Instrumentation)
W. Regairaz (Service Sécurité et Radioprotection)

LPSC and Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) are collaborating to develop an improved version of the PHOENIX source to boost the challenging production of heavy ions for the SPIRAL2 project. The source is being commissioned since 2015 at LPSC and the results are above expectation: the Ar¹⁴⁺ beam intensity is increased by more than 100%, along with calcium Ca¹⁴⁺ and Ca¹⁶⁺.

La source d'ions à la résonance cyclotronique électronique (RCE ou ECR en anglais) PHOENIX V3 a été financée par le projet européen CRISP ESFRI (2011-2014). La conception, le suivi de réalisation et une grande partie des pièces mécaniques ont été réalisées au LPSC en 2015. Le premier faisceau d'ions a été obtenu en mai 2016. Les innovations de cette source sont un plus grand diamètre de chambre à plasma (89 mm au lieu de 62 mm) et un meilleur vide résiduel rendu possible grâce à l'utilisation des techniques d'ultra-vide et l'ajout d'une pompe turbo-moléculaire située en amont de la source d'ions. Malgré une place plus faible pour l'hexapôle en aimants permanents, la qualité du confinement magnétique est conservée dans cette nouvelle version grâce à l'utilisation optimisée de nouvelles variétés d'aimants permanents. La figure 9 montre une vue de la source PHOENIX V3 sur sa ligne d'analyse.

Le plus grand diamètre de la chambre à plasma et le meilleur niveau de vide permettent d'une part d'avoir d'une part un plus grand volume de plasma et d'autre part de réduire le phénomène d'échange de charge qui limite la population nette d'ions de haut état de charge comme les ions $M/q=3$. L'amélioration de ces 2 paramètres laissait espérer une augmentation significative des intensités de faisceau d'ions d'intérêt pour l'accélérateur SPIRAL2. L'expérience a confirmé les attentes de la conception avec des intensités multipliées par 2,5 pour l'argon : 120 μA d'Ar¹⁴⁺ et multipliées par 2 pour le calcium avec 39 μA de Ca¹⁴⁺ (ce dernier résultat est à confirmer par une nouvelle campagne de mesure au printemps 2019). La figure 10 compare des spectres d'ions significatifs obtenus avec la version précédente (V2 en bleu) et la nouvelle version (V3 en rouge).

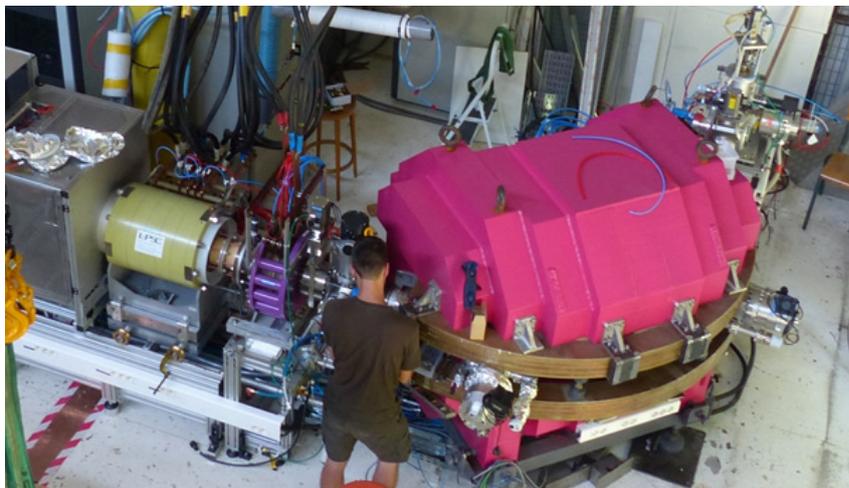


Figure 9 : Source d'ions PHOENIX V3 (cylindre vert sur la gauche) installée sur le Banc Fort Courant. Le dipôle DI3 modifié et installé en 2018 est visible en rose foncé sur la droite

Un effort important a été réalisé en 2018 pour améliorer le niveau de vide et le transport des ions dans la ligne d'analyse appelée « Banc Fort Courant » (visible sur la figure 9). Le spectromètre de masse d'origine a été remplacé par le dipôle DI3 qui était utilisé sur le cyclotron SARA. Ce dipôle a été modifié afin de pouvoir y placer une chambre ultravide de hauteur plus importante que la chambre initiale. Cette chambre a été réalisée à l'atelier du LPSC. Ceci a permis d'améliorer la transmission et la séparation des faisceaux d'ions après le dipôle pour mieux identifier les espèces ioniques émises par la source d'ions et mieux mesurer les émittances.

L'installation de la source d'ions au GANIL est planifiée à l'automne 2019 et marquera la fin d'un long investissement du LPSC (depuis 2004) dans le cadre de la construction de l'accélérateur SPIRAL2.

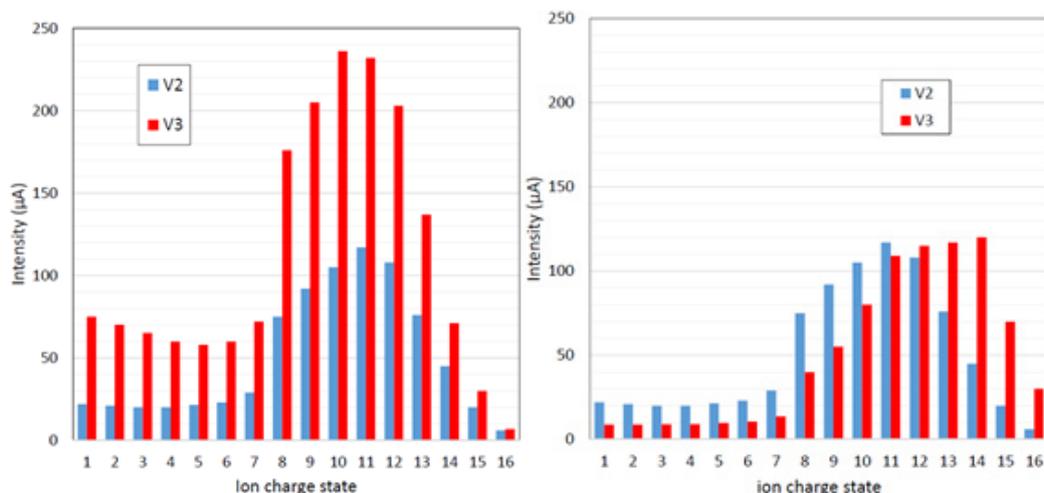


Figure 10 : Gauche: meilleur spectre de production d'ions multichargés de PHOENIX V2 (bleu) et V3 (rouge) pour la même pression limite d'opération de V2. Droite: le même spectre V2 (bleu) est comparé au spectre de V3 optimisé pour la production d'Ar¹⁴⁺ grâce à une pression de neutre plus basse (rouge).

4.1.7 Développement d'une source d'ions ECR à 5.8 GHz

J. Angot, M. Baylac, L. Bonny, J. Jacob, P. Sole, T. Thuillier

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 have greatly improved over the last three years: a beam intensity of 3.7 mA of H⁺ is produced with 31 W of HF power.

Le pôle Accélérateur et Sources d'ions a poursuivi le développement et les tests de la source d'ions ECR fonctionnant à la fréquence de 5,8 GHz. L'objectif est de mettre au point une source d'ions relativement compacte, 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 pour une faible puissance injectée. De nombreuses modifications ont été apportées afin d'améliorer les performances et la fiabilité de la source et deux nouvelles versions ont été réalisées. La deuxième version est utilisée sur l'accélérateur GENEP12 du LPSC où elle donne entière satisfaction (1mA de protons). Une troisième version a été mise au point (cf. fig. 11). Les améliorations ont porté d'une part sur un renforcement de la structure magnétique et d'autre part sur une amélioration du couplage de la puissance haute fréquence au plasma (remplacement du câble coaxial amenant cette puissance par un guide d'onde circulaire avec un insert en nitrure de bore). Enfin, une nouvelle extraction a été mise au point afin d'améliorer le transport du faisceau dans la ligne d'analyse. Les résultats marquants sont la production de 3.7 mA de protons à la puissance HF de 31W et la productions d'argon jusqu'à la charge 6+.



Figure 11 : Troisième version de la source compacte 5.8 GHz

4.1.8 Boosters de charge

J. Angot, M. Baylac, L. Bonny, J. Jacob, M. Migliore, P. Sole, T. Thuillier
N. Emeriaud, C. Geraci, J. Giraud, D. Grondin, H. Lucas-Henriques (CDD), D. Morotti, Y. Odievre, S. Roni, S. Roudier (Service Études et Réalisations Mécaniques)

The accelerator and ion sources pole develops a charge breeder ion source suitable for ISOL facilities. The development plan under implementation has already improved the performances. In this field, the pole collaborates with the two European facilities GANIL and LNL.

Développement de la source d'ions ECR « Booster de charge »

Le Pôle développe depuis les années 2000 une source d'ions ECR de type « Booster de charge ». Ces sources d'ions sont utilisées dans les accélérateurs utilisant la méthode ISOL (Isotope Separation Online) visant à étudier les faisceaux d'ions exotiques. Elle a pour but d'augmenter l'état de charge d'un faisceau d'ions $1+$ généré dans un ensemble cible source de façon à faciliter sa post-accélération. La source est caractérisée sur le banc de tests $1+N+$ (Fig. 12). En Europe, un Booster de charge du même type est en exploitation au Ganil (Caen, France) sur la ligne SPIRAL 1 upgrade. Un autre, fabriqué au LPSC en 2014, sera utilisé dans le cadre du projet SPES au LNL (Legnaro, Italie). Le LPSC collabore avec ces deux laboratoires pour continuer la R&D sur le Booster de charge.

Au LPSC, un plan de développement a été élaboré dans le but d'améliorer les performances de cet instrument.

Une première étape, implémentée en 2016, a consisté à améliorer le confinement magnétique axial. La campagne de mesures qui a suivi a permis de montrer une nette amélioration de l'efficacité de conversion $1+ \rightarrow N+$. Par exemple pour le Na^{8+} l'efficacité a progressé de 3.3 % à 12.9 % avec des temps de conversion proches.

L'étape suivante visera à raccourcir la source de 8 cm en supprimant une bobine axiale, ce qui permettra de faciliter les réglages et d'optimiser les performances. Les pièces sont en cours de fabrication et les expérimentations sont prévues pour démarrer à l'automne 2019.

Enfin, la dernière étape va consister à augmenter significativement le volume de la chambre à plasma ($\varnothing 72$ à $\varnothing 100$ mm), à diminuer le niveau de vide résiduel pour augmenter l'état de charge des ions $N+$ et enfin à réduire le taux des contaminants dans les faisceaux d'ions extraits. Cette configuration, en cours de conception mécanique, sera testée en 2021. L'ensemble des études de conception mécanique et la fabrication de la majeure partie des pièces est prise en charge par le Service Études et Réalisations Mécaniques du LPSC.

Le faisceau injecté dans le plasma du Booster de charge peut être utilisé pour étudier les plasmas ECR. Plusieurs campagnes expérimentales, menées dans le cadre de collaborations internationales, ont été réalisées et ont fait progresser la compréhension du plasma ainsi que les processus de capture et multi-ionisation mis en jeu dans ce type de sources.



Figure 12 : Banc de tests $1+N+$

Réduction des contaminants du Booster de charge SPES

Un contrat de collaboration a été signé en Septembre 2018 entre le LNL et le LPSC. L'objectif est de réduire le taux de contaminants co-extraits avec le faisceau d'ions N⁺. En effet, le plasma ECR ionise le gaz support du plasma ainsi que les ions injectés, mais aussi des contaminants de différentes provenances (dégazage des parois, impuretés des gaz support, pulvérisation des parois par le plasma, ...) qui peuvent se mélanger au faisceau d'intérêt (Fig. 13). Le rapport signal sur bruit est capital dans la méthode 1⁺→N⁺ car les taux de production des ions radioactifs peuvent être très faibles (<10⁶ pps). Si cette contamination est importante et mal gérée après le booster, l'étude de l'élément radioactif peut être compromise.

Ce contrat prévoit la fabrication de 3 chambres à plasma en aluminium ainsi que des campagnes expérimentales sur le banc de tests 1+N⁺ pour comparer différentes configurations, notamment avec l'utilisation de chemisages placés à l'intérieur de la chambre à plasma.

La conception mécanique des chambres à plasma en aluminium a débuté avec le support du Service Études et Réalisations Mécaniques du LPSC.

Afin de préparer au mieux ces expériences, une jouvence de la ligne 1+N⁺ est en cours. Pour faciliter l'alignement des éléments, des ports de visée vont être créés. Pour réduire les contaminants provenant de la ligne 1+N⁺, la ligne va être entièrement nettoyée et passée en standard ultra vide. Les modifications mécaniques sont en cours et la ligne est prévue d'être opérationnelle en Juillet 2019 pour commencer les expérimentations pour SPES en Septembre 2019.

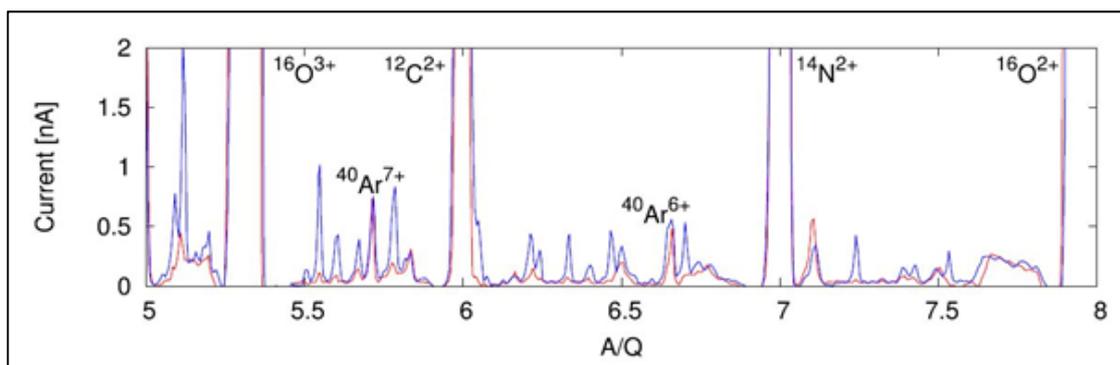


Figure 13 : exemple de spectre d'ions en fonction du rapport de masse/charge des contaminants mesurés selon 2 modes de fonctionnements du Booster de charges (tracés rouge et bleu). Pics d'argon, d'oxygène, d'azote et de carbone indiqués pour des raisons de commodité.

4.1.9 Projet METIS

J. Angot, L. Bonny, J.B. Cully, J. Jacob, A. Leduc, P. Sole, T. Thuillier
N. Emeriaud, C. Geraci, J. Giraud, D. Grondin, H. Lucas-Henriques (CDD), D. Morotti, Y. Odievre, S. Roni, S. Roudier (Service Études et Réalisations Mécaniques)

LPSC and Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) are collaborating to improve the understanding of Calcium ion beam production in ion sources. A PhD program is currently funded for this purpose and aims at studying by simulation the production of Calcium in an ECR ion source and comparing the results with experiments. A dedicated in situ calcium re-evaporation system has been developed and will be tested in 2019.

Une bourse de doctorat, cofinancée par l'IN2P3 et la région Normandie, a été obtenue à compter du 1er novembre 2016 pour étudier la dynamique des ions calcium dans une source d'ions à la résonance cyclotronique électronique. Le travail de thèse est co-encadré par L. Maunoury du GANIL et T. Thuillier du LPSC. L'objet de la thèse est d'étudier la dynamique des atomes et ions calcium dans le plasma de la source, d'identifier les pertes et de comparer les résultats de la simulation avec des mesures expérimentales. Un code de simulation hybride permettant d'étudier l'évolution temporelle de la population des ions multichargés dans la source d'ions PHOENIX

V3 est en cours de développement. Dans la source d'ions PHOENIX V3, les atomes de calcium sont injectés dans le plasma de la source grâce à un mini four qui évapore un échantillon de calcium solide. La probabilité de conversion d'un atome de calcium en ion utile extrait de la source est habituellement compris entre 5 et 20%. Cette faible efficacité a d'importantes répercussions financières compte-tenu du coût du ^{48}Ca (environ 200 k€/g). Un système chauffant thermo-régulé a été conçu et est en cours de construction au LPSC. Il sera testé en 2019 pour étudier l'efficacité de transformation d'atome en faisceau d'ions calcium en fonction de sa température.

4.1.10 Etude des instabilités cinétiques dans les plasmas RCE

J. Angot, M. Baylac, B. Bhaskar, L. Bonny, J.B. Cully, J. Jacob, T. Lamy, A. Leduc, P. Sole, T. Thuillier

LPSC and Jyväskylä University are collaborating to study the kinetic instabilities occurring in ECR plasmas. These instabilities deconfine electrons and high charge state ions in ECR ion sources and degrade their performances. A Joint PhD program is under progress to investigate the role of the magnetic field topology in the phenomenon.

Les performances des plasmas des sources d'ions à la résonance cyclotronique électronique (RCE) sont limitées par les instabilités cinétiques dues à l'anisotropie de la fonction de distribution des vitesses des électrons chauds du plasma. L'origine de cette anisotropie est inhérente au mécanisme de chauffage RCE qui augmente essentiellement la vitesse des électrons perpendiculairement aux lignes de champ magnétique. Lors des instabilités, un fort rayonnement synchrotron est observé, couplé à un déconfinement rapide d'électrons chauds. Il s'ensuit un déconfinement des ions et une perte de la population des ions multichargés du plasma sur plusieurs millisecondes, ce qui nuit à la stabilité des faisceaux d'ions produits pour les accélérateurs. Une thèse a démarré sur le sujet en décembre 2017, elle fait l'objet d'une cotutelle entre l'Université Grenoble Alpes et l'Université de Jyväskylä (Finlande). En 2018, le travail a consisté à modéliser la surface magnétique de la résonance en fonction des paramètres de réglage de la source d'ions, à l'aide d'ajustements multi-paramètres en trois dimensions. Des expériences de mesure des instabilités ont été menées à Jyväskylä et au LPSC en fonction des paramètres de la source d'ions. Le travail d'analyse est en cours pour rechercher des possibles corrélations entre la présence d'instabilités et une topologie particulière du champ magnétique.

4.1.11 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

Accélérateur linéaire pour le projet MYRRHA

- Isol@MYRRHA website : <http://isolmyrrha.sckcen.be/en>
- F. Bouly et al., "Commissioning of the MYRRHA Low Energy Beam Transport Line and Space Charge Compensation Experiments", Proceedings of IPAC 2017, TUOBA2, Lien : <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/tuoba2.pdf>
- Martin-Hoyo, F. Bouly et al., "Optimized Adaptive Control for the MYRRHA Linear Accelerator: Control System Design for a Superconducting Cavity in a Particle Accelerator », in IEEE Control Systems Magazine, vol. 38, no. 2, pp. 44-79, April 2018. doi: 10.1109/MCS.2017.2786420, lien : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8318839>
- M. Debongnie et al., Artificial Intelligence for smart control of particle accelerators, Accelerator Performance and Concepts Workshop, december 2018, Frankfurt Germany, lien: <https://indico.gsi.de/event/7510/session/3/#20181211>

Projet R&D Multipactor

D. Amorim et al., Design of a RF Device to Study the Multipactor Phenomenon, 7th International Particle Accelerator Conference, May 2016, Busan, South Korea, 2016

Projet JEDI

- Frank Rathmann et al: The search for electric dipole moments of light ions in storage rings 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 447 012011
- D. Eversmann et al : New Method for a Continuous Determination of the Spin Tune in Storage Rings and Implications for Precision Experiments - Phys. Rev. Lett. 115, 094801 (2015)
- G. Guidoboni et al: How to Reach a Thousand-Second in-Plane Polarization
- Lifetime with 0.97-GeV=c Deuterons in a Storage Ring - Phys. Rev. Lett. 117, 054801 (2016)

Booster de charge

- Diagnostics of a charge breeder electron cyclotron resonance ion source helium plasma with the injection of $^{23}\text{Na}^{1+}$ ions, O. Tarvainen, H. Koivisto, A. Galata, J. Angot, T. Lamy, T. Thuillier *et al.*, *Physical review accelerators and beams* 19, 053402 (2016).
- Plasma instabilities of a charge breeder ECRIS, O. Tarvainen, J. Angot, I. Izotov, V. Skalyga, H. Koivisto, T. Thuillier, T. Kalvas and T. Lamy, *Plasma Sources Sci. Technol.* 26, 105002 (2017).
- Charge breeding time investigations of electron cyclotron resonance charge breeders, Julien Angot *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 104801 (2018)

Thèses en cours :

- **Études des déflecteurs électrostatiques sur faisceaux de hadrons polarisés pour JEDI**, par Julien MICHAUD, directeur : JM De Conto, depuis octobre 2016
- **Études de l'efficacité de conversion de vapeurs métalliques des ions multichargés en sources ECR**, par Alexandre LEDUC, thèse en co-tutelle GANIL-LPSC, directeur : L. Maunoury (GANIL), co-directeur : T. Thuillier, depuis octobre 2016
- **Investigation of Plasma Kinetic Instabilities in ECR Ion Sources**, par Bichu BHASKAR, thèse en co-tutelle UGA-JYFL, directeur (JYFL) : H. Koivisto, co-directeur (UGA) : T. Thuillier, depuis décembre 2017
Machine learning appliqué aux accélérateurs, thèse CIFRE, directeur : JM De Conto, co-directeur: F. Bouly, depuis février 2018

4.2 Équipe Plasmas, Matériaux, Nanostructures

Équipe de recherche : membres permanents

S. Béchu, J. Bentounes, A. Bès, A. Lacoste

Équipe de recherche : doctorants et postdoctorants

S. Aleiferis, T. Le Coz (doct), I. Iliescu (postdoc), A. Martin Ortega, R. Yang

Y. Xi (doct, Équipe UCN)

Personnels des services techniques

L. Bonny, D. Fombaron

In the domain of plasma sources, the group activities are based on the concept of distributed microwave plasmas, particularly well suited to the scaling-up of plasma processing. The physical and numerical modelling of elementary plasma sources, study of new plasma source designs and extension of operating conditions for higher process flexibility are the main objectives of CRPMN.

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 and negative hydrogen ion production.

4.2.1 Introduction

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 plasma unitaires, jusqu'à la mise en œuvre de réacteurs et de procédés par plasma. Elle est structurée autour de deux principaux axes : 1) conception et étude de sources plasma 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, l'Université de Mostaganem (pour l'activité développée autour de la production d'hydrogène, EURO-Fusion), l'Université de Montréal et l'INRS de Varenne-Québec (pour les technologies plasma et procédés sur grande surface LIA-STEP, Carnot-Energies du futur, GDRI-NMC). L'équipe apporte également des compétences et savoir-faire complémentaires dans des projets collaboratifs menés en partenariat avec différents groupes de recherche de : IMMM (UMR6823), LPGP (UMR8578), CEA-IRFM, ESRF, ICMPE (UMR7182). Les projets à vocation applicative ont été conduits en partenariat avec des industriels comme, par exemple, Valeo, Ugitech, Thales, IREIS.

4.2.2 Physique et ingénierie des plasmas micro-ondes

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) de sources de plasma élémentaires alimentées individuellement en micro-ondes. 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, puissance, fréquence) et de l'optimisation de l'efficacité énergétique, du générateur de micro-ondes jusqu'à la terminaison de l'applicateur d'onde où le plasma est produit. Ainsi, suivant les applications visées, plusieurs types de sources élémentaires ont été développées pour aboutir à une configuration capable d'opérer sur un domaine de 4 décades en pression.

Physique des décharges micro-ondes

Outre les avantages procurés au niveau des applications, la source à domaine opératoire étendu 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 de ce 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 lié aux dimensions de la gaine, cette dernière étant principalement fixée par la géométrie du système d'injection de l'onde et par la fréquence de celle-ci. Cette étude fondamentale a également permis d'identifier, selon la

puissance injectée dans le plasma, différents modes de propagation (électromagnétique ou électrostatique) de l'onde, ainsi que les mécanismes d'absorption de puissance par les électrons.

Ingénierie des décharges micro-ondes

La connaissance précise de l'impédance du plasma est 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. 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. Cette approche a été appliquée pour le développement d'une source plasma à pression intermédiaire (de l'ordre de quelques Torr) dédiée au dépôt de diamant sur grande surface (projet ProExtend en maturation 2017-2018, SATT-Linksum). En particulier, l'influence de la fréquence de l'onde a été étudiée pour valider l'expansion spatiale (figure 1) et l'uniformité du plasma jusqu'à des pressions de quelques dizaines de Torr. La validation de l'uniformité a été réalisée dans un démonstrateur (à 12 coupleurs) mis en œuvre au LPSC, et des résultats très prometteurs ont été obtenus pour la croissance du diamant nanocristallin et microcristallin (figure 2) sur des substrats de 100 mm de diamètre, et ce dans un même réacteur, uniquement par changement de paramètres opératoires. Le procédé d'élaboration du diamant en film mince est en cours de développement pour optimiser la vitesse de croissance. Les résultats obtenus sont d'une importance majeure, non seulement pour le cas particulier du dépôt de diamant, mais aussi pour tout autre procédé qui exige l'utilisation de fortes puissances et des pressions supérieures au Torr, afin d'assurer de grandes vitesses ou cadences de fabrication avec uniformité conforme.

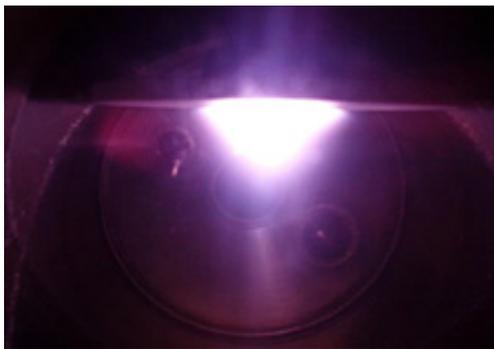


Figure 1 : Plasma d'hydrogène (H_2 , 1 Torr, 200 W) obtenu par deux sources élémentaires différentes à 2.45 GHz (gauche) et à 915 MHz (droite).

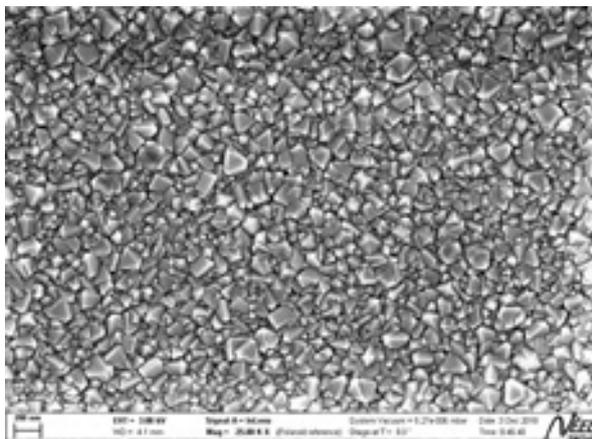


Figure 2 : Film de diamant polycristallin obtenu par PECVD (plasma de mélange CH_4/H_2 à 5 Torr) sur une plaquette en Si (\varnothing 100 mm).

Physique des plasmas et Techniques de caractérisation associées

La spécificité des sources plasma développées au sein du groupe réside dans la séparation de fonctions : production du plasma et polarisation indépendante des surfaces immergées dans la décharge. En plus du domaine très large en pression et en puissance qui peut être exploré, cette séparation de fonctions permet la réalisation d'études paramétriques pour la recherche fondamentale, aussi bien au niveau de la production d'espèces en volume, qu'au niveau de l'interaction plasma-surface. Nos études ont été concentrées sur les plasmas d'oxygène (pour l'étude de la cinétique de réactions de croissance des oxydes de vanadium) et d'hydrogène (pour l'étude de la production d'atomes d'hydrogène et d'ions atomiques négatifs). Pour ces études, des techniques de caractérisation spécifiques sont utilisées, dont certaines développées au LPSC.

Dans les plasmas d'hydrogène, une activité importante a été menée, au niveau fondamental, sur le bilan production-pertes d'espèces à l'interface plasma-matériau (2 thèses en cotutelle avec les universités de Patras et de Mostaganem). Les travaux réalisés au LPSC et au synchrotron SOLEIL (sur la ligne de lumière DESIRS) ont permis de mettre en évidence l'effet, par rapport au quartz, de la nature du matériau en contact avec le plasma (W , T_a), autant sur la densité d'ions négatifs, que sur les intensités d'absorption des raies relatives aux molécules $H_2^+(v'' > 6, J'')$. Le même bilan a été effectué en volume, dans des plasmas d'hydrogène obtenus dans différents types de réacteurs, tels que : CYBELE du CEA-Cadarache, RAID de Suisse Plasma Center, source d'ions du LPSC. Cette étude, très importante du point de vue applicatif, a permis de démontrer :

- i) l'efficacité d'une source hélicon de type « birdcage » par rapport à un plasma inductif classique
- ii) la création d'ions négatifs H^-/D^- à la périphérie de la colonne de plasma, ce qui tend à accréditer une production par attachement dissociatif entre molécules $H_2^+(v'' > 6, J'')$ et électrons de faible énergie
- iii) l'effet isotopique sur le courant d'ions négatifs extraits car $I(D^-) < I(H^-)$.

4.2.3 Physique et ingénierie des matériaux en couches minces

La flexibilité que confère la technologie plasma développée au LPSC grâce à la séparation de fonctions et au contrôle quasi-indépendant du flux et de l'énergie de bombardement d'une surface, permet d'envisager et de mettre en œuvre des procédés d'élaboration des matériaux complexes de composition et 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). 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 la croissance sélective d'une phase souhaitée. La pulvérisation (réactive ou non) assistée par plasma multi-dipolaire (technologie développée au LPSC) constitue donc 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 :

- i) aux hydrures complexes à base de magnésium (post-doc / CARNOT et projet collaboratif avec l'équipe de Chimie Métallurgique des Terres Rares de ICMPE),
- ii) aux composés à changement de phase (ANR-PRCI, LIA-STEP),
- iii) aux contacts électriques sur diamant monocristallin (ANR MONODIAM) ; iv) films en multicouches pour l'imagerie neutronique de haute résolution (projet collaboratif avec l'équipe UCN du LPSC).

Dans le domaine des détecteurs, une réalisation importante concerne la croissance séquentielle du bore et des interfaces (Ti, Ni) 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 films catalyseurs d'interface et avec des métaux moins onéreux (Al, Cu, In) que celui qui est habituellement utilisé (Au).

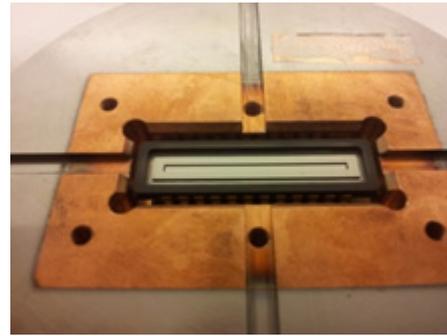
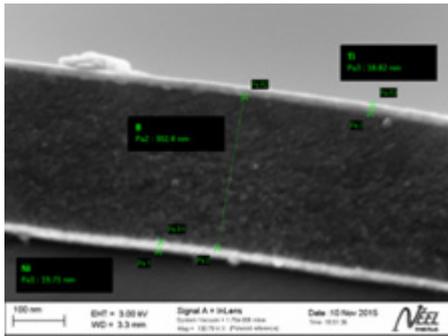


Figure 3 : Dépôt de Ni/¹⁰B/Ti (gauche) par pulvérisation assistée par plasma multi-dipolaire réalisé sur un détecteur CCD (droite).

Dans le domaine de l'énergie, des films de Mg-Ti-H avec différentes teneurs en Ti ont été élaborés afin d'étudier la transformation de microstructure et de propriétés fonctionnelles du MgH₂ induite par l'élément dopant. Par rapport au même composé non-dopé, les principaux résultats obtenus pour un film de MgH₂ dopé avec 5% de Ti sont l'augmentation d'un facteur 8 de la vitesse de désorption de l'hydrogène ainsi que la diminution de la température de désorption qui passe de ~420 °C à ~275 °C (figure 4).

L'étude menée en collaboration avec ICMPE (sur les anodes de conversion dans les batteries Li-ion) a permis de démontrer que les phénomènes d'irréversibilité dans les films de MgH₂ lors du cyclage électrochimique sont dus au transport de masse lent (à température ambiante) des espèces dans l'électrode (MgH₂/Cu), et non pas à la dégradation de contact électronique comme il était auparavant supposé. Ce résultat est d'une importance majeure dans la définition des stratégies futures de développement des batteries Li-ion qui devraient être axées sur la compréhension et l'amélioration du transport de masse à l'état solide d'atomes d'hydrogène, de lithium et de métaux dans l'électrode.

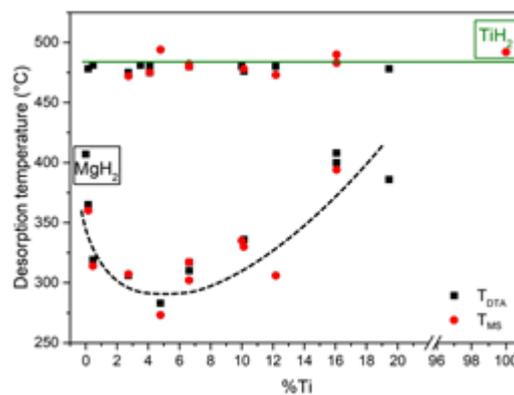
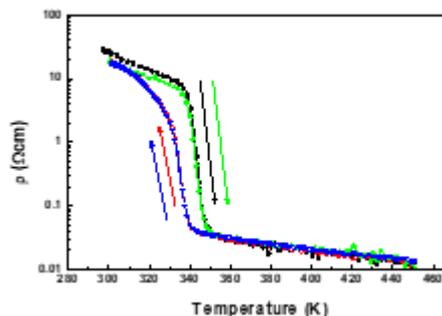
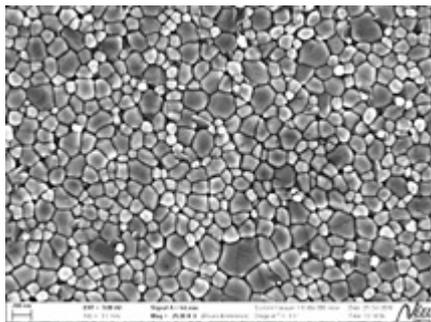


Figure 4 : Influence de la concentration du Ti sur la température de déshydrogénation du MgH₂.

Dans le domaine des composés à changement de phase, tels que les matériaux thermo-chromiques (VO₂), les principaux défis actuels sont : l'obtention de la phase VO₂ sur des grandes surfaces (> cm²) et à des températures inférieures à 500 °C. Par rapport aux techniques bien maîtrisées (Plasma-Laser-Deposition, Magnétron) pour le dépôt sur des substrats de petites dimensions et aux procédés développés en deux étapes (dépôt suivi de recuit ex-situ) pour la diminution de la température, la méthode élaborée au LPSC et les résultats obtenus se démarquent par :

- i) La synthèse du VO₂ in-situ, en une seule étape (sans recuit),
- ii) le dépôt sur une surface de 100 mm de diamètre
- iii) le dépôt à 350 °C, avec des propriétés microstructurales et physiques conformes (figure 5).

Ces résultats sont essentiels pour un développement industriel du procédé.



4.2.4 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

1. Open-ended coaxial plasma source with extended operating parameters: plasma impedance, coupling and energy efficiency, <http://www.ingentaconnect.com/content/iop/psst/2014/00000023/00000006/art064006>
2. Dehydrogenation process and thermal stability of Mg-Ti-H films in-situ hydrogenated by microwave reactive plasma-assisted co-sputtering technique, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838818326604?via%3Dihub>
3. Thin films as model system for understanding the electrochemical reaction mechanisms in conversion reaction of MgH₂ with lithium, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.09.033>
4. Diamond sensors for future high energy experiments, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216300560>
5. S. Aleiferis, Étude expérimentale de la production d'ions négatifs H⁻ par des plasmas à la résonance cyclotron électronique, soutenue le 07/07/2016, cotutelle UGA-Université de Patras (Grèce)
6. A. Martin Ortega, Power absorption mechanisms and energy transfer in X-ray gas attenuators, soutenue le 19/01/2017, thèse ESRF avec co-encadrement LPSC
7. J. Bentounes, Etude expérimentale de la production d'un courant d'ions négatifs appliquée à la fusion thermonucléaire contrôlée par utilisation de techniques spectroscopiques et confrontation des résultats expérimentaux à un modèle numérique, soutenue le 27/09/2018, codirection UGA- Université de Mostaganem (Algérie).
8. T. Le Coz, Fonctionnalisation d'un fil métallique par croissance de films minces dans un magnétron cylindrique inversé, soutenue le 15/02/2018), CIFRE Ugitech.
9. Y. Xi, Détecteur de neutrons ultra-froids sensible à la position, soutenance prévue le 15/10/2019, codirection UCN - Plasmas-Matériaux-Nanostructures.
10. I. Iliescu, Déshydrogénation et stabilité thermique des composés Mg-Ti-H, 2017, projet CARNOT Energies du Futur.
11. A. Martin Ortega, Développement de sources plasma à pression intermédiaire pour dépôt de diamant sur grande surface, 2017-2018, projet ProExtend, SATT-Linksum.