

Recherche interdisciplinaire

Au LPSC, la pluridisciplinarité est présente sous plusieurs formes: hadronthérapie, imagerie médicale et physique des plasmas. Cette recherche – ouverte sur la société et très exigeante – contribue à nous enrichir dans nos secteurs thématiques. Ces activités vont également de pair avec la vocation d'enseignement du laboratoire dans les secteurs de la médecine nucléaire et des plasmas.

Depuis la découverte des rayons X et leurs applications à la radiographie, la médecine bénéficie du fruit des recherches menées en physique subatomique. Le LPSC participe à cette tradition dans le secteur de la médecine nucléaire: en hadronthérapie et en imagerie médicale. Le cancer est devenu la première cause de mortalité en France. Chaque année plus de 150 000 patients bénéficient d'une radiothérapie par photons dans l'un des 179 centres français. La radiothérapie par photons est très efficace (participe à 50% de guérisons), mais il existe des tumeurs qui du fait de leur localisation – proches d'organes sensibles – ou de leur forte résistance aux radiations sont difficiles voire impossibles à traiter avec des appareils conven-

tionnels. La radiothérapie par protons – lesquels possèdent une balistique dans les tissus humains beaucoup moins fluctuante que les photons – permet de traiter plus précisément et donc plus efficacement les tumeurs radiosensibles localisées à proximité d'organes fragiles. Cependant d'un point de vue biologique, l'efficacité des protons reste la même que celle des photons, alors que la radiothérapie par ions carbone – du fait de leur Efficacité Biologique Relative (EBR) accrue d'environ 50% par rapport aux protons – peut être appliquée sur les tumeurs radiorésistantes avec une précision balistique meilleure que celle des protons. En France, la construction du centre ETOILE a été approuvée par les Ministères de la Santé, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche en mai 2005. Ce projet est porté par un Groupement de Coopération Sanitaire (GCS-ETOILE) mis en place en 2007. ETOILE vise le traitement de son premier patient en 2014. À cette date, plusieurs autres centres européens de carbone-thérapie seront déjà en fonctionnement, dont le CNAO en Italie auquel le LPSC participe depuis 2004.

La tomographie par émission de positons fait l'objet depuis 2001 de recherches intenses au sein de l'équipe Interface Physique-Médecine. Avec peu de moyens mais beaucoup de pugnacité, cette équipe a achevé le test d'un prototype, fonctionnant avec du xénon liquide, pouvant constituer un micro-tomographe à émission de positons destiné au petit animal. Les excellentes performances atteintes confirment les promesses de cette technologie innovante. En parallèle à cette activité, ce groupe s'est également engagé aux côtés du LETI, de la société Biospace et de nombreux autres laboratoires dans le développement d'un autre concept de micro-tomographe basé sur l'utilisation d'un semi-conducteur. Topase – le nom de ce projet – a reçu un soutien du programme TECSAN de l'ANR et jouit actuellement d'une forte dynamique au LETI. Cette équipe s'est par ailleurs ouverte à la collaboration avec d'autres laboratoires grenoblois et régionaux (LIS, TIMC et le CERMEP) sur l'implémentation d'algorithmes de reconstruction d'images sur des systèmes électroniques optimisés.

Le Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures (CRPMN) exploite avec beaucoup de réussite une partie des travaux pionniers de Richard Geller dans le domaine des plasmas auquel nous tenons à rendre hommage dans ce texte. Les recherches menées depuis 2006 par le CRPMN au sein du LPSC ont porté essentiellement sur le développement de nouvelles générations de plasmas micro-onde capables d'offrir des performances accrues, des conditions opératoires élargies et un meilleur contrôle des procédés mis en œuvre. Cette activité s'est développée grâce aux structurations préparées et mises en place depuis 2006 qui sont désormais opérationnelles. Elles concrétisent la forte ouverture du CRPMN à l'international et son partenariat très fort avec le milieu industriel. Sous l'impulsion du CRPMN, la physique des plasmas constitue à l'Université de Grenoble une discipline à part entière enseignée dans de nombreuses filières de formations initiales et continues. Le CRPMN est devenu une composante entière et intégrée du LPSC auquel il apporte d'autres compétences rares et très utiles pour l'avenir.

Hadronthérapie

J. Collot

D. Grondin, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques

O. Bourrion, R. Foglio, D. Tourres, C. Vescovi, Service Électronique

E. Froidefond, J. Fourrier, F. Méot, J. Pasternak, Service Accélérateurs et Source d'ions

Since 2004, LPSC has been involved in the construction of CNAO in Pavia, Italy. In 2011, CNAO will start treating cancer patients using proton and carbon-ion beams delivered by a medical synchrotron. LPSC has participated to the tests of the synchrotron dipoles, to the construction of the betatron magnet used in the slow extraction system, to the design & construction of the low-level electronics of the accelerator cavity and to beam dynamics studies. In parallel to this activity, LPSC also took a leading role in the design & prototyping of a FFAG accelerator for protontherapy.

CNAO

Depuis 2004, le LPSC participe à la construction du CNAO (Fig. 1). Les objectifs recherchés sont d'une part d'acquies l'expérience de la réalisation d'un synchrotron médical et d'autre part de renforcer la synergie européenne dans ce domaine (med-AUSTRON – le futur centre autrichien de hadronthérapie – a également signé un accord de partenariat avec le CNAO et le CERN).

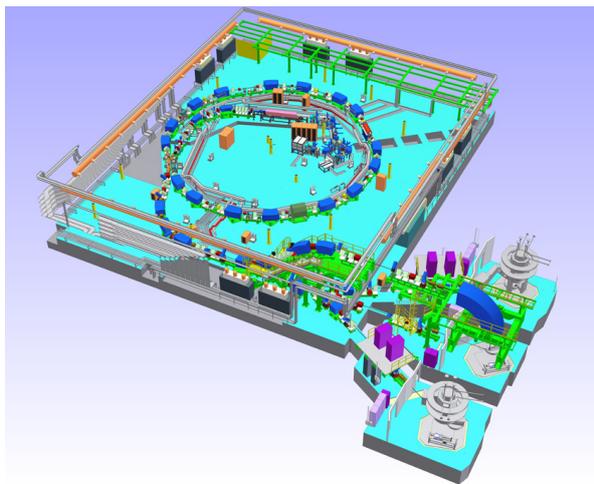


Fig. 1 : Vue 3 D du CNAO (centre national de traitement du cancer par hadronthérapie de Pavie) qui devrait ouvrir ses portes en 2010.

Au CNAO, la partie accélératrice de haute énergie est un synchrotron qui délivrera des protons et des ions carbone jusqu'à une énergie de 200 MeV et de 400 MeV/u.m.a., respectivement. Ce synchrotron, d'un diamètre de 25 m environ, comprend 16 dipôles, 24 quadripôles, 5 sextupôles et une cavité accélératrice. La construction du CNAO a démarré en mars 2005. Les éléments de l'accélérateur sont en place depuis le début 2009, ce qui permet d'envisager un démarrage des traitements en 2010.

Compte tenu de ses capacités, le LPSC s'est engagé dans les mesures magnétiques de réception des dipôles, l'optimisation de l'optique des faisceaux, la réalisation de la carte électronique de premier niveau de pilotage

de la cavité accélératrice et son logiciel de contrôle et dans la construction de l'aimant bêatron associé à l'extraction des faisceaux.

La réception et la mesure des dipôles du synchrotron du CNAO ont pris fin en 2009. Les tolérances exigées en matière d'homogénéité et de reproductibilité du champ magnétique sont à un niveau inédit pour ce type de machine, ce qui a nécessité la construction d'un nouvel appareil de mesure. La rapidité recherchée du cycle temporel du champ magnétique a demandé de modifier le principe d'alimentation des dipôles et de corriger le feuilletage de leurs tôles.

L'électronique chargée de piloter l'unique cavité accélératrice du synchrotron à partir des consignes envoyées par le système de contrôle/commande de l'accélérateur a été prise en charge par le LPSC. Différents prototypes ont été réalisés, testés puis validés en 2006-2007 sur la cavité accélératrice installée provisoirement au CERN. Le dernier prototype a été testé sur le booster du PS du CERN afin de valider les boucles de contrôle du faisceau. Les cartes finales réalisées en 2008 devraient être installées et réglées à la fin de 2009 sur le synchrotron définitif au CNAO. Une période d'optimisation en fonctionnement est prévue en 2010.

Le LPSC a été impliqué dans la conception, la réalisation mécanique et la fourniture d'un aimant bêatron toroidal utilisé pour l'extraction lente des faisceaux du synchrotron. Ce système inductif permet de positionner progressivement le faisceau sur une résonance horizontale de la machine, laquelle conduit à l'accroissement de son rayon d'oscillation bêatron et finalement à son extraction. L'aimant construit par la société SIGMAPHI est installé sur le synchrotron depuis novembre 2008. Il a été testé avec succès à l'automne 2009.

RACCAM

RACCAM est un projet ANR (2006-2008) porté par le LPSC dans lequel ont été impliqués deux centres de radiothérapie (de Grenoble et de Lyon), des industriels (Sigmaphi), IBA et AIMA-Développement ainsi que le Centre Antoine Lacassagne de Nice.

Ce projet est pluridisciplinaire car il s'intéresse à la mise en œuvre de la méthode des FFAG (Fixed Field Alternating Gradient accelerator), pour l'accélération rapide de faisceaux de protons destinés à la hadronthérapie mais aussi de faisceaux de particules instables, par exemple de muons dans une usine à neutrinos. RACCAM procède également à l'évaluation du concept FFAG pour une machine complète de protonthérapie (Fig. 2). Ceci inclut le prototypage de l'aimant de courbure et de focalisation, dans le cas d'une optique FFAG dite « spirale ». Au titre de la R&D « usine à neutrinos », RACCAM fournit un cadre de participation aux collaborations internationales du domaine (FP6-CARE/BENE, ISS-NuFact), et en particulier au projet EMMA, maquette en électrons (10 à 20 MeV) d'un accélérateur pour muons, en construction aujourd'hui au laboratoire de Daresbury en Angleterre.

Les synchrotrons à champ fixe sont basés sur des aimants linéaires (quadripôles) ou non-linéaires (tels ceux qui sont proposés pour l'usine à neutrinos de J-PARC). RACCAM aborde les deux domaines, le premier dans le cadre du projet EMMA (code de simulation, dynamique de faisceau...), le second dans le cadre du prototypage d'aimants spiraux et de la conception du système accélérateur d'un anneau démonstrateur en protons, à énergie variable entre 70 et plus de 200 MeV. RACCAM a abouti à une première: la conception d'un anneau FFAG à optique spirale en protons, qui permettrait d'évaluer la dynamique de ces machines ainsi que les composants technologiques clés tels que le système RF ou l'aimant. Les paramètres de ce démonstrateur sont orientés vers la protonthérapie. Ce concept ouvre la voie à des « usines à particules » présentant une extraction symétrique multiple et à énergie variable.

Le prototype de l'un des aimants visibles sur la figure ci-dessous a été réalisé par la compagnie Sigmaphi avec la participation du Service des Études et des Réalisations Mécaniques qui a assuré le dessin et le suivi de production de ses plaques de garde magnétique.

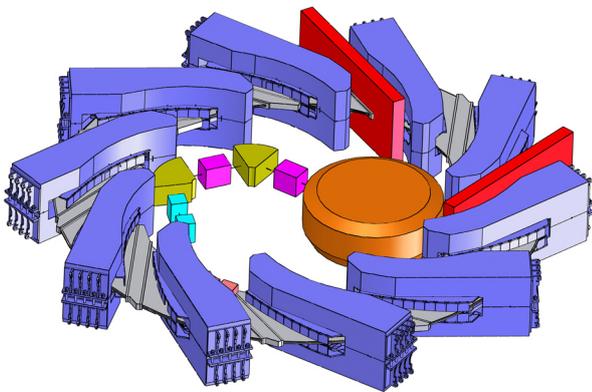


Fig. 2 : Vue d'un accélérateur FFAG à protons destiné au traitement du cancer. Cette figure a fait la une du CERN Courier en septembre 2008.

Pour en savoir plus

- http://lpsc.in2p3.fr/service_accelerateurs/raccam.html
- <http://www.cnao.it>

Tomographie

M.-L. Gallin-Martel, O. Rossetto

M. Marton, J.-F. Muraz, Service Détecteurs et Instrumentation

J.-L. Bouly, J. Bouvier, L. Gallin-Martel, J.-P. Richer, Service Électronique

Y. Carcagno, D. Grondin, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques

Y. Grondin (TIMC-IMAG)

Positron Emission Tomography (PET) is one of the leading techniques of nuclear medicine. Although the image resolution is slightly worse than the one obtained with MRI, PET provides direct access to metabolic and functional information. PET is used for various medical and biological applications, such as oncology, cardiology as well as pharmacology. Tremendous experimental efforts on a host of techniques have been made in the field of PET imaging, in particular towards the development of new generation PET cameras, including depth of interaction measurements. This subject is developed at LPSC through a R&D program on a liquid Xenon μ PET, dedicated to small animal imaging, through the development of novel image reconstruction architectures and through a participation to the construction of a CdTe semiconductor μ PET prototype.

Le projet micro TEP au Xénon Liquide

Principe de la Tomographie à Émission de Positons (TEP)

La TEP constitue l'une des méthodes d'imagerie in vivo métabolique utilisée en médecine. Elle repose sur l'utilisation de noyaux radioactifs, émetteurs β^+ injectés au patient dans le but de produire une image avec une excellente résolution. Le noyau radioactif est inséré dans une molécule, par exemple du glucose. Une fois injectées, les molécules marquées par un élément émetteur β^+ (^{18}F ou ^{15}O) se fixent sur les zones cibles, permettant d'en imager le métabolisme en glucose ou le débit sanguin. En effet les tumeurs cancéreuses présentent un métabolisme en glucose extrêmement important. Dans le cas de la TEP, la désintégration du noyau radioactif produit un positon (e^+) qui s'annihile ensuite avec un électron. Il y a émission de deux photons γ à 180° qui sont ensuite détectés en coïncidence par un ensemble de détection constitué d'un milieu scintillant couplé à des photodétecteurs. L'obtention de l'image se fait in fine par reconstruction à partir des données brutes (rétroprojection filtrée).

Résultats et performances des modules prototypes

Les propriétés de scintillation du xénon liquide utilisé dans notre projet sont remarquables en terme de rapidité (environ 30 ns) et d'intensité ce qui le rend très compétitif dans ce domaine d'application. Les cristaux habituellement utilisés tels que le LSO, disposés radialement, sont remplacés ici par des modules de xénon liquide disposés axialement (mesure possible de la profondeur d'interaction). Chaque module est équipé d'une matrice de guides de lumière. La difficulté réside dans le fait que la température est de 165 K et que la scintillation a lieu à 178 nm. La lumière est collectée aux extrémités des guides par des photomultiplicateurs à anodes croisées (PSPMT-Hamamatsu). Le

repérage du guide de lumière touché au sein de la matrice permet une localisation en x et en y alors que la mesure d'asymétrie sur les signaux recueillis à chacune des extrémités permet d'accéder à la coordonnée z.

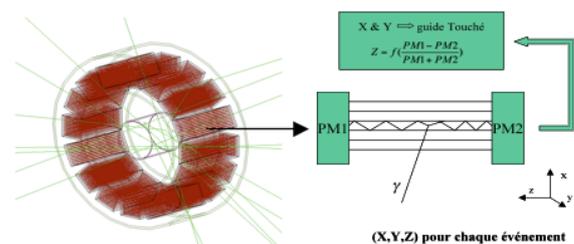


Fig. 1 : μ PET LXe: principe de localisation en (x,y,z) sur un module.

Ce projet s'est déroulé en deux phases. La phase I a consisté tout d'abord à étudier les performances d'un module du détecteur. L'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure à une résolution en énergie σ/μ de 10% (RMS) et à une résolution spatiale intrinsèque de la cellule de l'ordre de 0,6 mm (RMS) en x et en y (pour des guides de section $2 \times 2 \text{ mm}^2$) et de 2 mm (RMS) sur la troisième coordonnée z en moyenne sur les 50 mm du module. Ces résultats ont été jugés très encourageants, une collaboration a donc été initiée entre le LPSC, le TIMC-IAMG et le LIS¹, deux laboratoires Grenoblois travaillant sur le traitement du signal en imagerie médicale afin d'obtenir une évaluation de la qualité des images pouvant être obtenue avec un système complet soit une couronne de 16 modules. Une deuxième phase expérimentale mettant en coïncidence deux modules a démarré en janvier 2008. Son objectif était de simuler une reconstruction 3D de l'image de la source à partir de plusieurs acquisitions réelles avec deux modules immobiles et en implémentant une rotation virtuelle des modules dans les programmes de reconstruction. Les premiers résultats obtenus (juin 2009) sont très satisfaisants et démontrent la pertinence du travail de reconstruction d'images.

¹ Laboratoire des Images et des Signaux

Réalisations techniques

La mise en œuvre expérimentale du projet s'est faite en collaboration avec les services Détecteurs et Instrumentation, Électronique, et Études et Réalisations Mécaniques du LPSC.

Dans le banc de test qui a été conçu pour la phase I (Fig. 2 haut), la cellule à Xénon liquide est placée dans un cryostat alimenté par un dispositif cryogénique permettant de fournir le Xénon liquide et de maintenir la température à 165K. Une source de ^{22}Na de 4 MBq est placée sous le cryostat. Des collimateurs en plomb sont disposés de manière à pouvoir irradier le prototype à travers une tranche transaxiale (x,y) de 2 mm de large. Cet ensemble est monté sur un système mobile suivant la direction axiale (z). L'ensemble du plan (x,y) est uniformément irradié ce qui permet de tester l'efficacité de séparation des guides de lumières et donc la résolution transaxiale. Sur le même dispositif mobile, on place un détecteur LYSO couplé à un photomultiplicateur pour permettre de détecter les événements en coïncidence avec le module prototype, soit une paire de γ de 511 keV émis par la source de ^{22}Na .

Dans la phase II de l'étude deux modules LXe sont mis en coïncidence (Fig. 2 bas). La source de ^{22}Na utilisée dans la phase I est mise cette fois-ci à l'intérieur du cryostat et peut se translater suivant un axe contenu dans le plan constitué par l'axe des deux modules. Le système d'acquisition de la phase I n'étant plus adapté (nombre de voies de mesures), une électronique de traitements des signaux des PM ainsi qu'un système d'acquisition (64 voies) générant des fichiers au format ROOT, système plus portable que le précédent car il permet une analyse en ligne, ont été spécialement développés.

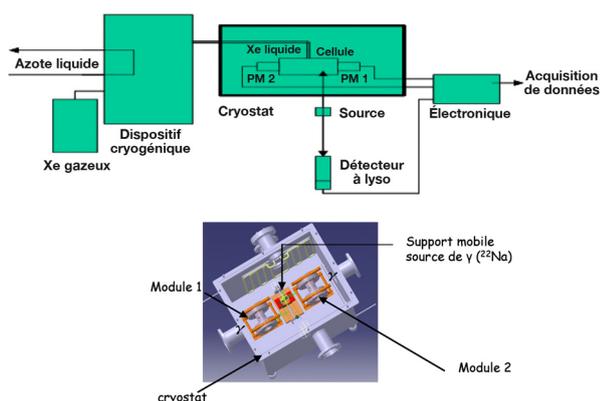


Fig. 2: Dispositif expérimental phase I et phase II.

Architecture matérielle pour la reconstruction d'images

Pour passer des données brutes fournies par les détecteurs aux images (2D ou 3D) finales, un calcul souvent lourd et complexe est nécessaire. Ce calcul peut prendre de quelques minutes pour les cas les plus simples à plusieurs heures, voire dizaines d'heures, pour de l'imagerie dynamique avec des algorithmes de reconstruction élaborés. Il y a une forte demande de la part des utilisateurs pour réduire considérablement ces temps de calculs.

En collaboration avec trois laboratoires de la région (le LIS, TIMC et le CERMEP), nous avons initié un projet de recherche dont l'objectif est de réaliser ces calculs de reconstruction d'images sur des systèmes électroniques dont l'architecture est optimisée pour le type de calcul à effectuer. Les premiers résultats de cette étude sur un cas simple de reconstruction 2D ont montré que des facteurs importants peuvent être gagnés : avec une électronique aux capacités limitées, des gains en temps de calcul allant de 2 à 4 ont été démontrés. Le type de calcul à effectuer se prête bien à une parallélisation de ces derniers (le calcul d'un pixel image peut être fait indépendamment de ses voisins). La parallélisation des calculs est donc uniquement limitée par les ressources matérielles disponibles et par le débit de données engendré.

Un système dédié intégrant 7 SoPC (System On Programmable Chip) de la dernière génération (contenant 2 cœurs de processeur PowerPC, 128 unités MAC et plusieurs dizaines de milliers de cellules logiques) ainsi que plusieurs centaines de méga-octets de mémoire par SoPC (nous utilisons des barrettes de mémoires analogues à celles utilisées dans les PC portables) est en cours de validation. Le laboratoire est le maître d'œuvre de cette réalisation, les partenaires se focalisant plus sur les aspects algorithme et adéquation matériel/algorithme. Le volume total d'information à traiter ou à stocker est de l'ordre de plusieurs giga-octets. Le système intègre de ce fait une unité de disque ainsi que des interfaces ethernet pour échanger ces données avec l'extérieur. L'utilisation de composants SoPC qui sont des composants reprogrammables offre une certaine souplesse, puisque le même système pourra être utilisé pour implémenter différents algorithmes classiquement utilisés en TEP.

Les simulations effectuées ont montré que cette architecture est performante et optimale en terme de nombre de cycles nécessaires pour une reconstruction d'image. En revanche, la nouvelle génération de GPU, permet d'obtenir, grâce à leur fréquence de fonctionnement élevée, des temps de reconstruction moindre, bien que nécessitant un plus grand nombre de cycles.

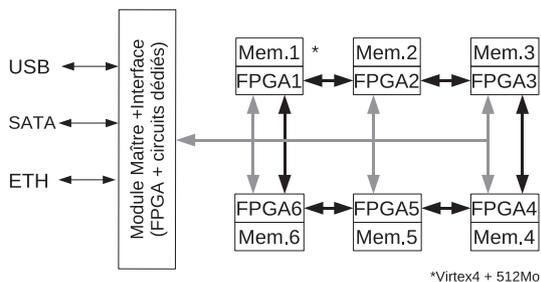


Fig. 3 : Schéma de l'architecture de reconstruction d'images TEP développée.

aussi la mesure de l'énergie d'un événement au niveau d'un module de détection de 16 voies. L'interface vers le système d'acquisition est conçue de façon à pouvoir chaîner un ensemble de circuits pour obtenir un système de traitement autonome par module.

Pour en savoir plus

- Gallin-Martel et al.; Nucl. Instrum. Methods A, 2009, vol. 599, p. 275-283.

Caméra TEP à semi-conducteurs, projet TOPASE-MED

La collaboration topase-med, financée sur un contrat ANR TECSAN, a pour objectif la réalisation d'un prototype de caméra TEP utilisant un détecteur à semi-conducteur CdZnTe. Cette collaboration regroupe les laboratoires CEA-LETI, CEA-SHFJ, LATIM, l'unité INSERM U594, le LPSC et la société Biospace.

Dans le cadre de cette collaboration, le LPSC a été chargé d'imaginer les systèmes électroniques de traitement permettant de répondre aux exigences induites par l'utilisation de semi-conducteurs comme détecteurs : faible consommation, temps mort réduit, haute densité de voies de mesures, résolution temporelle de l'ordre de la nanoseconde...

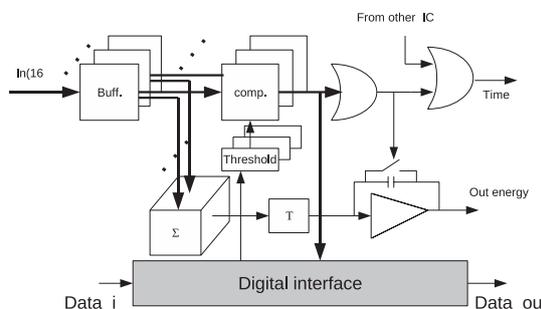


Fig. 4 : Schéma de principe de l'architecture d'un ASIC destiné au traitement de 16 voies de mesure du μ PET à semi-conducteur.

Chaque détecteur élémentaire, d'une épaisseur de 1mm, est composé de 16 anodes de lecture. Ces détecteurs sont ensuite assemblés en un module de 16 éléments afin de couvrir une surface de détection de 16x16 mm². Ces modules permettent ensuite de concevoir une caméra complète modulaire en fonction de l'agencement des modules.

Le laboratoire a proposé une architecture d'ASIC permettant le traitement de 16 voies de mesures (pour le traitement d'un module détecteur) qui permet d'effectuer la sélection des événements valides (grâce à un discriminateur en courant à seuil programmable), le déclenchement de l'acquisition afin de dater les événements et le transfert des informations des voies touchées vers le système d'acquisition. Le circuit permet

Centre de recherche plasmas-matériaux-nanostructures

S. Béchu, A. Bès, M. Diers, A. Lacoste, H. Le Quoc, M. Koo, J. Pelletier, M. Rayar, G. Régnard

The main research lines of CRPMN are the development of innovative plasma technologies issued from fundamental research and their applications in different fields such as surface treatments, elaboration of new materials for energy conversion, production mechanisms of negative deuterium ions in plasmas (ITER project), microelectronics and micro-nanotechnologies. In the domain of plasma sources, CRPMN carries on previous studies on distributed microwave plasmas, particularly well suited to the scaling up of plasma sources. Physical and numerical modelling of elementary plasma sources, study of new plasma designs, and extension of operating conditions for higher process flexibility are the main objectives of CRPMN. Of course, such plasmas are favourably applied to surface processing and other applications where enhanced specifications must be met.

Les deux principaux axes de recherche couvrent le domaine des technologies des couches minces qui émergent comme procédés spécifiques issus des technologies plasma développées au sein du CRPMN. Le centre abrite également une ERT avec l'entreprise HEF R&D et est associé à un laboratoire international – le LITAP (Laboratoire International des Technologies et des Applications des Plasmas) – qui regroupe 2 laboratoires grenoblois (LPSC et SIMAP), l'université et l'INRS de Montréal.

Physique et ingénierie des réacteurs plasma

L'extension d'échelle des plasmas est obtenue par distribution, selon un réseau 2D ou 3D, d'un ensemble de sources élémentaires alimentées de manière individuelle et indépendante à partir d'un générateur micro-onde. La différence essentielle entre les divers types de sources (multi-dipolaires et matriciels) porte sur le mode préférentiel de couplage onde-plasma. Du point de vue technologique, le mode de couplage résulte de la configuration de la source plasma élémentaire placée en extrémité d'un applicateur micro-onde. Celui-ci, tout comme le reste de la ligne d'application et de transport des micro-ondes, est identique aux deux types de sources. Ainsi, la source plasma élémentaire de la technologie multi-dipolaire est constituée d'un dipôle magnétique favorisant le couplage résonnant RCE (Résonance Cyclotronique Électronique), très efficace dans le domaine des très basses pressions, de 10^{-3} à 10^{-2} torr. Par contre, dans la technologie matricielle, la terminaison de la ligne micro-onde est dépourvue de champ magnétique et le couplage s'effectue plutôt par le biais des collisions électron-neutre (couplage collisionnel), efficace dans le domaine des pressions plus élevées, de 10^{-1} à 10 torr. La modélisation et l'étude expérimentale de ces deux types de sources ont fait l'objet de deux sujets de deux thèses financées par le projet européen MATECO. Le transfert vers des applications à échelle industrielle s'inscrit dans le cadre de l'ERT Plasmas HF et donne lieu à une thèse CIFRE.

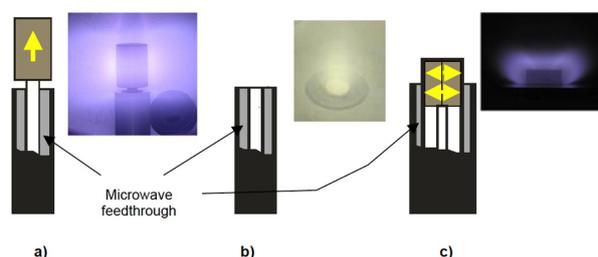


Fig. 1 : Configuration de différents types de sources élémentaires : a) plasma multi-dipolaire avec aimantation axiale (10^{-3} - 10^{-2} torr) ; b) plasma matriciel sans champ magnétique (10^{-1} - 10 torr) ; c) plasma micro-onde distribué à conditions opératoires étendues avec aimantation radiale ($2 \cdot 10^{-5}$ - 10 torr).

Si chacune de ces deux technologies est bien adaptée à des applications spécifiques dans des domaines de pression bien distincts, une nouvelle configuration de source élémentaire brevetée en 2008 est actuellement étudiée (ANR blanc Plasmodie, 2006-2009). Les premiers résultats obtenus démontrent que cette nouvelle configuration permet une transition continue du couplage RCE au couplage collisionnel, couvrant ainsi un domaine de pression étendu de $2 \cdot 10^{-5}$ à 10 torr et avec des performances accrues en termes de densité plasma.

Toutes ces technologies permettent l'obtention de plasmas de très fortes densités (jusqu'à 10^{13} cm⁻³), supérieures à la densité critique ($7,8 \cdot 10^{10}$ cm⁻³ à 2,45 GHz) grâce à la production du plasma par absorption localisée de la puissance micro-onde.

Outre les fortes densités plasma, un autre avantage fondamental de ces technologies micro-ondes réside dans la séparation des fonctions, d'une part production du plasma, et d'autre part réglage des paramètres d'interaction plasma-surface. Ceci est d'une importance déterminante, aussi bien au niveau des études fondamentales qui peuvent être effectuées de manière paramétrique qu'au niveau de la flexibilité des conditions opératoires dans les applications nécessitant une maîtrise parfaite des paramètres des procédés (e.g. flux et énergie de bombardement).

Cette séparation des fonctions a permis en particulier d'imaginer de nouveaux concepts en ingénierie des réacteurs plasma comme la polarisation des surfaces par injection d'électrons dans les plasmas, ou le nettoyage des réacteurs de dépôt (brevet en 2006). Concernant le nettoyage des réacteurs plasma, la polarisation indépendante des substrats permet de modifier de manière cyclique le niveau du potentiel plasma par rapport aux différentes surfaces en contact avec le plasma, le porte-substrat ou les parois.

Au niveau plus fondamental, nos technologies micro-onde et les diagnostics qui y sont mis en œuvre permettent aussi d'étudier les mécanismes de production d'espèces (atomes, métastables, radicaux, ions positifs et négatifs) en fonction des conditions opératoires, et de manière découplée entre volume et surface. Ainsi, dans les plasmas d'hydrogène, la température du gaz et les taux de dissociation obtenus en plasma matriciel permettent d'envisager le dépôt de diamant nanocristallin à basse pression (30 Pa), sur grandes surfaces (ANR Plasmodie). Dans les plasmas multi-dipolaires d'hydrogène, l'étude par photo-détachement laser et sonde de Langmuir de la distribution spatiale des concentrations en ions négatifs H^- (projet ANR ITER-NIS), depuis la surface jusqu'au volume, permet de remonter aux mécanismes réactionnels de surface en fonction des propriétés de la surface (nature des matériaux, orientation des surfaces, travail de sortie, nature des liaisons et énergie d'adsorption de l'hydrogène) et des paramètres d'interaction plasma-surface (température, flux et énergie des espèces).

Physique et ingénierie des matériaux en couches minces

La flexibilité que confèrent ces technologies plasma permet d'imaginer et de mettre en œuvre des procédés d'élaboration des matériaux relativement complexes et bien contrôlés. C'est le cas, en particulier, de la fabrication de nanostructures (nanostructures magnétiques) et des procédés pour applications tournées vers les microtechnologies (gravure, dépôt) et la microbiologie (stérilisation plasma), mais aussi de l'étude de matériaux fonctionnels comme ceux permettant la conversion d'énergie.

L'implantation ionique par immersion plasma (ou PBII comme plasma-based ion implantation) est particulièrement bien adaptée à l'élaboration de matériaux nouveaux (e.g. métastables) et à la fabrication de micro- ou nanostructures grâce à des procédés duplex (dépôt et implantation), ou séquentiels (e.g. dépôt puis implantation à travers un masque). En effet, l'implantation d'éléments légers (N, O, F, C...) à quelques dizaines de keV permet de modifier fondamentalement les propriétés de ces couches (e.g. propriétés magnétiques) sur une profondeur de l'ordre de la dizaine de nm et donc d'élaborer des nanostructures (e.g. magnétiques) de manière très simple. La mise en œuvre des

nouvelles générations de technologies plasma permet en particulier de réaliser des procédés duplex dépôt & implantation (PBII&D) avec des propriétés de couches (composition, contraintes intrinsèques) parfaitement contrôlées (collaboration avec la Technical University of Denmark, Copenhague).

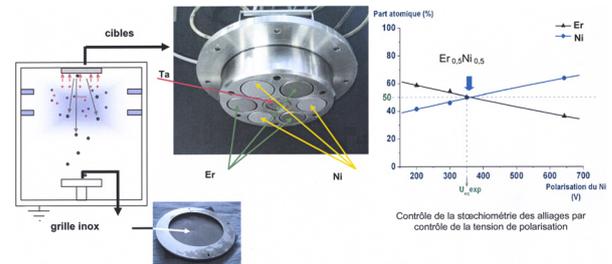


Fig. 2 : Élaboration d'alliages en couches minces à composition contrôlée.

Des études fondamentales de gravure plasma ont aussi été réalisées sur les effets du dopage (silicium) et de la température (silicium, polymères) en vue d'une meilleure compréhension des mécanismes réactionnels de surface et de leurs cinétiques. En outre, dans le cadre du LIA-LITAP, la collaboration sur l'étude des mécanismes de stérilisation par plasma (destruction de l'ADN par les UV, gravure par les espèces oxydantes) se poursuit.

De manière générale, les matériaux pour la conversion d'énergie (matériaux à forte capacité calorifique, alliages à mémoire de forme, matériaux thermoélectriques, matériaux magnéto-caloriques...) sont des alliages binaires ou ternaires qu'il est important d'élaborer avec une composition très bien contrôlée. La pulvérisation assistée par plasma multi-dipolaire, qui permet de remplir cette spécification constitue un outil privilégié pour l'élaboration de ces alliages en couches minces en vue de l'étude de leurs propriétés fondamentales. Ainsi, l'étude de différents alliages possédant de fortes capacités calorifiques à très basse température ont fait l'objet de contrats successifs avec le CEA Grenoble (2006, 2007). En parallèle, l'étude de matériaux thermoélectriques à partir d'alliages binaires ou ternaires à base de magnésium, silicium et étain fait actuellement l'objet de deux thèses.

Pour en savoir plus

- <http://lpsc.in2p3.fr/crpmn>

