

RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE

Applications médicales

Depuis la découverte des rayons X et ses applications à la radiographie, la médecine bénéficie depuis la fin du 19^e siècle du fruit des recherches menées en physique fondamentale et expérimentale, grâce aux équipes de recherche situées à l'interface de ces deux disciplines. Le LPSC de Grenoble participe à cet effort à travers des projets interdisciplinaires qui illustrent parfaitement les axes de recherche sur lesquels la physique peut contribuer aux progrès de la médecine :

- Le diagnostic par des techniques d'imagerie rapides et non invasives. En particulier, les outils de diagnostic in vivo des métabolismes participent aujourd'hui de façon cruciale à la recherche médicale.
- La thérapie par utilisation de faisceaux d'ions, très efficace dans le traitement de certaines tumeurs radio-résistantes.

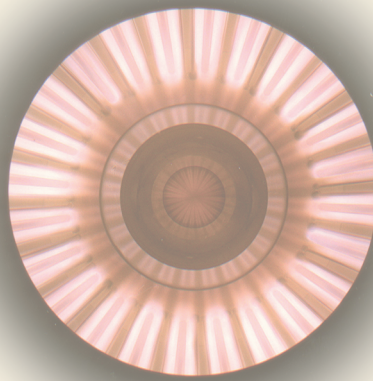
Ainsi, la tomographie par émission de positons (TEP) fait l'objet depuis six ans de recherches au sein de l'équipe Interface Physique-Médecine. Cette équipe a développé un prototype de micro-tomographe à émission de positons (μ TEP) à xénon liquide et son électronique associée. Elle a pris part également à l'effort international de simulation Monte-Carlo dédiée aux applications médicales utilisant l'expertise acquise en physique des particules (en particulier, code Geant4) en intégrant la collaboration OpenGATE. En collaboration avec trois laboratoires de la

région, dans le cadre d'ArchiTep, l'équipe s'investit également dans la réduction des temps de reconstruction d'images, répondant ainsi à une forte demande du milieu médical.

Le LPSC, et en particulier le Service des Accélérateurs, participe depuis 2000 aux études techniques pour la création d'instruments destinés au traitement des tumeurs cancéreuses par irradiation avec des ions légers (protons, carbone). Il s'est impliqué dans le développement de nouvelles configurations d'accélérateurs (cf. projet RACCAM), et dans l'avant-projet technique du synchrotron du projet ETOILE (Espace de Traitement Oncologique par Ions Légers Européen) de la Région Rhône-Alpes, et apporte aussi son expertise aux projets équivalents italien (CNAO) et allemand (HIT) afin d'aider aux prises de décisions concernant ETOILE.

Physique des plasmas

L'accueil du Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures (CRPMN) au sein du LPSC, aux côtés du Service Sources d'Ions (SSI), a permis de rassembler en un même lieu des compétences et un savoir-faire uniques en France et dans le monde sur les plasmas micro-onde et en particulier les plasmas générés à la résonance cyclotronique électronique (RCE). Ainsi, les recherches fondamentales menées depuis 2006 au



CRPMN 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 et qui sont désormais opérationnelles dans le cadre du Contrat Quadriennal 2007-2010 du LPSC et au-delà. Ces structurations, qui concrétisent la forte ouverture du CRPMN à l'international et l'existence de partenariats forts avec le milieu industriel concernent essentiellement:

- La création du LITAP (Laboratoire International de Technologies et Applications des Plasmas), LIA du CNRS, qui regroupe les équipes plasma de deux laboratoires de Grenoble (LPSC et SIMAP) et de deux laboratoires de Montréal (Université de Montréal et INRS-emt).

- La mise en place d'une Filière Francophone de Physique des Plasmas rassemblant l'Université de Montréal, l'Université de Danang et l'Université Joseph Fourier.

- La labellisation d'une équipe de recherche technologique, l'ERT Plasmas HF, conduite avec la société HEF R&D.

- La mise en place progressive, dans le cadre du CPER 2007-2013, de la plate-forme technologique SIRCE (sources d'ions et de plasmas à la résonance cyclotronique électronique de 100 MHz à 100 GHz), commune au SSI et au CRPMN.

Tous ces partenariats contribuent fortement au rayonnement de la discipline à la fois dans les milieux académiques et dans le tissu industriel. Ainsi, sous l'impulsion du CRPMN, la physique des plasmas constitue désormais, à l'Université de Grenoble, une discipline à part entière enseignée dans de nombreuses filières de formations initiales et continues à l'UJF et à l'INPG.

Groupe Interface Physique-Médecine

Marie-Laure Gallin-Martel, Olivier Rossetto

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 allows having 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. Moreover, the development of a dedicated Monte-Carlo simulation toolkit is also one of the main goals of the nuclear medicine community. Time reconstruction is also a limitation for real time and dynamic PET exploration, so that dedicated hardwares for image computation become a key for high performance PET development.

These two subjects are developed at LPSC, with the R&D program on a liquid Xenon μ PET, dedicated to small animal imaging, and the Monte-Carlo simulation activities. The experimental effort comprises both the development of the μ PET itself (cryogeny, detection of VUV at low temperature) and the study of dedicated electronics. Simulation efforts have been made, first with the development of a Geant4 based Monte-Carlo program (GePEToS), mainly dedicated to PET, and then with the participation to the OpenGATE international collaboration, aiming at providing an open source toolkit for nuclear imaging (PET, SPECT), also based on Geant4. The LPSC also initiated a research project on dedicated hardware architectures (based on SOPC) study for image reconstructions.

La tomographie par émission de positons (TEP) constitue l'une des méthodes d'imagerie in vivo métabolique utilisée en médecine. Actuellement, les enjeux dans ce domaine portent notamment sur le développement de caméras innovantes, incluant par exemple une mesure de la profondeur d'interaction, la simulation Monte-Carlo pour l'imagerie nucléaire mais aussi l'amélioration des temps de reconstruction d'images 3D.

Ces trois thèmes sont traités par l'équipe du LPSC, par le développement d'un microTomographe à Émission de Positons (μ TEP) à xénon liquide (LXe), par l'implication dans la collaboration OpenGATE pour l'aspect simulation ainsi que par la mise en place à l'initiative du laboratoire d'une collaboration locale et régionale dans le domaine des architectures matérielles dédiées à la reconstruction d'images TEP dans le cadre du projet ARCHITEP.

Introduction

L'imagerie nucléaire (TEP, gamma-caméra) repose sur l'utilisation de noyaux radioactifs, émetteurs β^+ ou γ , 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 imaginer le métabolisme en glucose ou le débit sanguin. Le glucose peut par exemple être utilisé pour imaginer des tumeurs cancéreuses, qui 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

(liquide ou solide) couplé à des photodétecteurs. L'obtention de l'image se fait in fine par reconstruction à partir des données brutes (rétroprojection filtrée par exemple). Cette technique est utilisée dans de nombreuses disciplines de la médecine et de la biologie (oncologie, cardiologie, pharmacologie, neurosciences...) chez l'homme, l'animal et le petit animal (rat, souris). Cependant, la résolution et la rapidité de la reconstruction logicielle des images 3D restent un frein majeur pour de nombreuses applications.

Notre projet se situe donc dans ce contexte et vise à développer des solutions innovantes sur les deux points suivants :

- L'amélioration de la résolution par l'utilisation de détecteurs au xénon liquide (mesure de la profondeur d'interaction).
- L'amélioration des temps de reconstruction par l'utilisation de techniques matérielles/logicielles adaptées.

MicroTEP au Xénon liquide

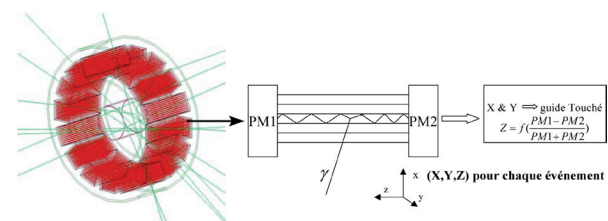


Figure 1 : μ PET LXe schéma général de la caméra et principe de localisation en (x,y,z) sur un module.

Le LPSC s'est engagé dans l'étude d'un prototype de μ TEP au xénon liquide, dont les propriétés de scintillation sont remarquables de par sa rapidité (environ 30 ns) et de par son intensité, meilleure que celle de l'INa, 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 (voir figure 1) disposés axialement [1]. Chaque module est équipé d'une matrice de 4 guides de lumières en x et 10 guides de lumière en y de longueur 50 mm et de section $5 \times 2 \text{ mm}^2$. 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 troisième coordonnée z (voir figure 1).

Un banc de test a été conçu pour étudier les caractéristiques d'un module prototype de ce qui constituera la caméra μ TEP. La cellule à xénon liquide est placée dans un cryostat (voir figure 2) alimenté par un dispositif cryogénique permettant de fournir le xénon liquide et de maintenir la température à 165 K (température du LXe). 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 lumière et donc la résolution transaxiale (voir figure 3). 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 .

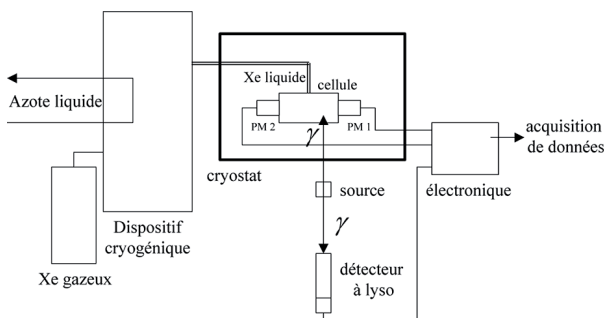


Figure 2 : Banc de test du module prototype.

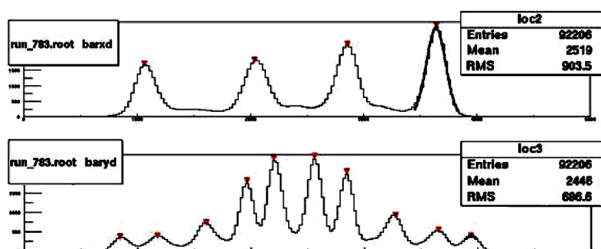


Figure 3 : Séparation des guides de lumière en x (4 guides en x) et en y (10 guides en y).

La simulation du banc de test a permis de mettre en évidence le fait que la caractérisation de la cellule passe par la détermination d'un paramètre appelé longueur d'atténuation λ qui rend compte complètement de la propagation des photons UV dans un guide (absorption par des polluants et atténuation par réflexions sur les parois). Après cette phase de calibration guide par guide de la cellule, le signal de photo-pic a pu être isolé (voir figure 4). 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 sur la troisième coordonnée z de 2 mm (RMS) en moyenne sur les 50 mm du module.

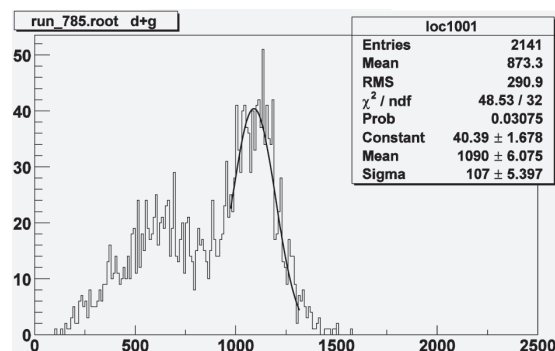


Figure 4 : Signal de photo-pic obtenu sur un guide de lumière à la position $z_{Na} = 0$ (milieu de cellule).

Cette analyse expérimentale atteste des performances du module prototype de la caméra μ TEP en accord avec la simulation par GePETos [2]. Une étude est actuellement en cours avec le logiciel de simulation GATE [3] pour une simulation complète de la caméra qui, couplée avec les algorithmes de reconstruction d'images mis au point par la collaboration ARCHITEP à laquelle le LPSC appartient, devrait apporter des réponses encore plus précises sur le potentiel innovant d'une telle caméra.

Simulation Monte-Carlo pour l'imagerie nucléaire

Il existe une forte demande de la communauté médicale pour le développement d'un simulateur Monte-Carlo dédié aux applications médicales, présentant à la fois une simplicité d'utilisation et également une pérennité et une stabilité dans le temps, indispensable à la comparaison des futurs projets de caméras. L'apport de la communauté Physique des Particules réside dans son expertise en simulation Monte-Carlo (par exemple dans l'utilisation du logiciel Geant4), appliquée ici aux basses énergies. Dans ce contexte, le LPSC a joué un rôle pionnier en développant un package de simulation Monte-Carlo (GePEToS) basé sur Geant4 et dédié à la TEP. Ce code a été validé sur des données expérimentales d'une caméra TEP (ECAT EXACT HR+ de Siemens), puis rendu publique [4]. À la suite de ce développement, l'équipe du LPSC a intégré la collaboration internationale OpenGATE [3].

Pour évaluer les performances attendues du TEP petit animal à xénon liquide, des simulations ont été produites grâce au logiciel GATE (Geant4 Appliqué à la Tomographie d'Émission de Positons). La géométrie particulière de ce nouveau type de détecteur ainsi que le banc de test expérimental ont été implémentés dans ce simulateur Monte-Carlo. Le module de détection a été défini comme une boîte à section carrée divisée en 20 compartiments à section rectangulaire représentant les guides de lumière dont les dimensions réelles ont été respectées. Le revêtement en aluminium de ces guides n'a pas été simulé pour le moment, mais des travaux antérieurs considèrent qu'il n'influe pas de manière significative sur la détection des photons gamma de 511 keV [2]. Les caractéristiques du xénon liquide ont été rajoutées à la liste des matériaux définis dans GATE (symbole, numéro atomique, densité). Les principaux composants du cryostat dans lequel est placé le détecteur ont été également simulés en respectant leur dimensions et caractéristiques. La source simulée est un émetteur synthétique de photons gamma de 511 keV et a été placée sous le module à la distance réelle de l'expérience. Elle est sphérique de rayon égal à 1 mm et a une activité simulée de 1 MBq. Les blocs de plomb servant à collimater la source le long de positions axiales précises pour la mesure de la résolution en z, ont été également simulés. La présence du LYSO dans l'expérience servant à la détection en coïncidence et agissant ainsi comme un collimateur spatial et temporel, a été pris en compte dans la simulation en ajoutant d'autres blocs de plomb réduisant l'orifice par lequel peuvent passer les photons gamma à un carré de surface égale à celle du LYSO. Cependant, la dimension temporelle n'a pas été prise en compte pour l'instant. Les interactions des photons gamma dans le xénon liquide ont été simulées en utilisant les bibliothèques de processus physique de Geant4 auxquelles GATE fait appel. En sortie de GATE, une collection de « hits » a été obtenue correspondant aux différents dépôts d'énergie effectués lors des différentes interactions, à savoir effet photoélectrique, diffusion Compton et diffusion multiple des électrons. Ces données ont été exploitées dans un programme Monte-Carlo externe permettant de simuler à partir des dépôts d'énergie la scintillation du xénon liquide et la réponse du détecteur (coefficient de réflexion des guides, efficacité quantique des PM...).

Les simulations ont consisté à faire translater l'ensemble source et collimateur le long de l'axe du détecteur et à déterminer la résolution en z en chaque position.

Il est envisagé maintenant de simuler les performances du scanner complet intégrant 16 modules et d'évaluer la résolution spatiale obtenue sur des images. Ce travail, qui a été en partie effectué dans des travaux antérieurs [2], est à refaire à la lumière des nouveaux résultats expérimentaux et à l'aide d'outils de simulation plus avancés (GATE utilise des versions récentes de Geant4). Par ailleurs, des programmes analytiques et itératifs de reconstruction d'image développés par une équipe par-

tenaire du projet ARCHITEP vont permettre d'utiliser des algorithmes performants pour reconstruire les données simulées avec une résolution optimale.

Architecture matérielles 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 [5] ont montré que des facteurs importants peuvent être gagnés : avec une électronique aux capacités limitées, des gains en temps de calculs allant de 2 à 4 ont été démontrés. Le type de calculs 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.

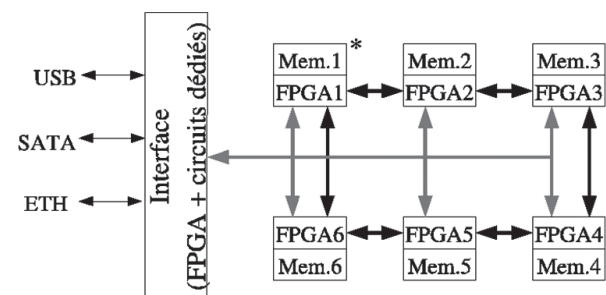


Figure 5 : Architecture du système de reconstruction d'images conçu.

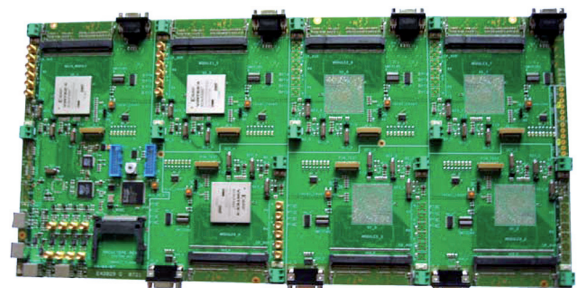


Figure 6 : Réalisation matérielle du système de reconstruction d'images.

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-octet de mémoire par SoPC (nous utiliserons 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 algorithmes et adéquation matériel/algorithme. Le volume total d'informations à traiter ou à stocker est de l'ordre de plusieurs giga-octets. Le système intégrera 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.

- 1 M.L. Gallin-Martel *et al.*, *A liquid Xenon Emission Tomograph : design and first prototype cell results*, article en préparation
- 2 S. Jan, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, *Simulateur Monte-Carlo et caméra à xénon liquide pour la Tomographie à Émission de Positons*, septembre 2002
- 3 S. Jan *et al.* (OpenGATE Collaboration), *GATE - Geant4 Application for Tomographic Emission : a simulation toolkit for PET and SPECT*, *Phys. Med. Biol.* 49 (2004) 4543-4561
- 4 S. Jan *et al.*, GePEToS : a Geant4 Monte-Carlo simulation package for Positron Emission Tomography, [physics/0312019](#), *IEEE Transactions on Nuclear Science* 52 (2005) 102
- 5 S. Mancini *et al.*, *Application d'un cache 2D prédictif à l'accélération de la rétroprojection TEP 2D*, *Traitement du signal*, Vol. 5, n°6, 2006

Hadronthérapie et CNAO

Maud Baylac, Olivier Bourrion, Johann Collot (responsable scientifique), Jean-Marie De Conto, Emmanuel Froidefond, Robert Foglio, Denis Grondin, Damien Tourres, Christophe Vescovi, Francis Vezzu (responsable technique)

Since 2004, cancer has been the first cause of decease in France, where each year 280,000 new cancer cases are diagnosed. More than 60 % of these patients benefit from a conventional radiotherapy delivered by a linear electron accelerator. In spite of the fact that conventional radiotherapy remains a very efficient treatment, there exist radio resistant or badly-located tumours which are extremely difficult if not impossible to cure with conventional apparatus. For these cases, which may amount to 12 % of the patients, hadrontherapy – either using protons or carbon ions - offers a higher potential of recovery. While ETOILE - the French National Centre for Hadrontherapy in Lyon – will call for Private Public Partnership bids in 2008, the LPSC, which participated to the Technical Design of ETOILE, has been involved in the construction of CNAO in Italy since 2004. The LPSC is committed to the design and the production of the slow extraction betatron magnet, of the low-level RF electronics, to the test of dipole magnets and to the optimization of the beam optics.

Depuis 2004, le cancer est devenu la première cause de mortalité en France. Sur 509 400 décès recensés en 2004, 152 700 (30 %) étaient dus à ce fléau, alors que sur la même année, les maladies cardio-vasculaires causaient la mort de 147 200 (29 %) personnes.

Depuis 2002, on dépiste chaque année plus de 280 000 nouveaux cas de cancer. Les patients suivent de nombreux traitements (chirurgie, chimiothérapie...), mais la majorité d'entre eux (60-70 %) bénéficie d'une radiothérapie par photons dans l'un des 179 centres français qui exploitent au total 360 accélérateurs linéaires à électrons. Le coût moyen d'une radiothérapie demeure modeste puisque le total associé à ce type de traitements ne représente que 12 % des dépenses nationales de santé liées au cancer.

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 les appareils conventionnels.

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. Mais 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 radio-résistantes avec une précision balistique comparable à celle des protons.

Une enquête menée en 2003 par ETOILE sur le recrutement médical enregistré sur une journée dans 21 centres de radiothérapie a montré qu'environ 12 % des patients auxquels avait été prescrite une radiothérapie conventionnelle, auraient été potentiellement mieux traités par une hadronthérapie, et qu'un peu moins de la moitié d'entre eux auraient plutôt dû bénéficier d'un traitement par ions carbone. Extrapolés à la popula-

tion française, en tenant compte d'autres enquêtes et des incertitudes associées, ces chiffres se traduisent par 18 000 indications par an pour la hadronthérapie dont 3 600 pour la radiothérapie par ions carbone. Un centre performant pourrait traiter jusqu'à 1 500 malades par an. La France ne possède que deux centres de protonthérapie (Centre de Protonthérapie d'Orsay, Centre Antoine Lacassagne de Nice) qui traitent chacun plusieurs centaines de patients par an.

Alors que les centres de protonthérapie se multiplient rapidement dans le monde, à ce jour seul le Japon dispose de deux installations offrant sur le même site des faisceaux de protons ou d'ions carbone. Deux autres centres entrèrent en fonctionnement prochainement en Europe: HIT (Heidelberger Ionenstrahl-Therapie) à Heildelberg (début 2008) et CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) à Pavie (début 2009). En France, la construction d'un centre similaire – 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 qui devrait tenter d'établir dans les deux ans à venir – par appel d'offres public – un Partenariat Privé Public avec un contractant, lequel aura alors à sa charge la construction, l'exploitation technique et la maintenance de l'installation. ETOILE vise le traitement de son premier patient en 2012.

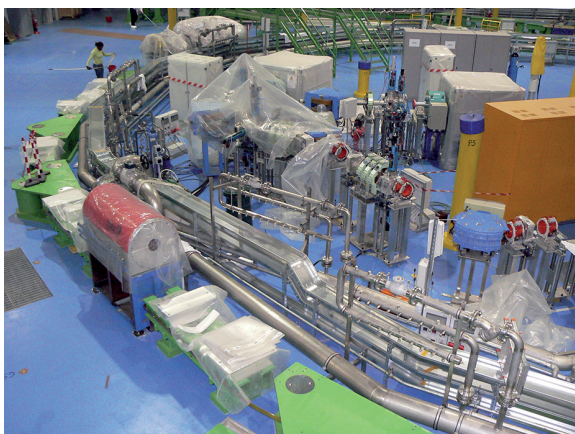
En 2004, alors que le dossier pour la création d'un Pôle National de Hadronthérapie par Ions Légers à Lyon était soumis aux ministères de tutelle, le LPSC – qui avait amplement participé à l'avant projet technique simplifié d'ETOILE – décidait après concertation avec l'IN2P3 et le CPER rhône-alpin ETOILE de s'engager dans la construction du CNAO. Les objectifs recherchés étaient d'une part d'acquérir l'expérience de la réalisation d'un synchrotron médical et d'autre part de renforcer la synergie européenne dans ce domaine. Il est à noter que med-AUSTRON – le futur centre autrichien de hadronthérapie – est également sur le point de signer un accord de partenariat avec CNAO.

Participation à la construction de CNAO

Au CNAO, la partie accélératrice de haute énergie est un synchrotron à fonctions séparées qui permettra de délivrer 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 périmètre de 75 m environ, comprend 16 dipôles, 24 quadripôles, 5 sextupôles pour une seule cavité accélératrice.

Compte tenu de ses possibilités, le LPSC s'est engagé dans les mesures magnétiques de réception des dipôles, dans l'optimisation de l'optique des faisceaux, dans la réalisation de la carte électronique de premier niveau de pilotage de la cavité accélératrice, dans son logiciel de contrôle associé et dans la construction de l'extracteur des faisceaux, qui reprend le dispositif par effet bêtatron mis au point au laboratoire Saturne à Saclay.

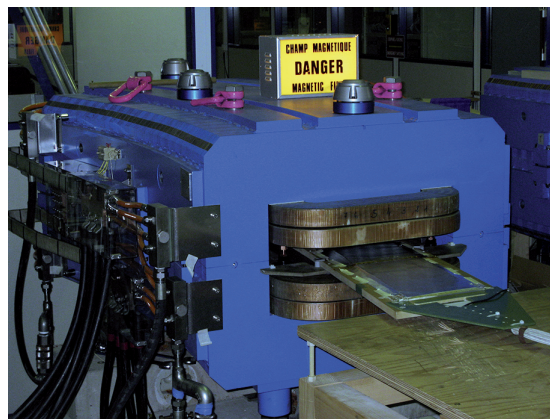
La construction du CNAO a démarré en mars 2005 (voir photos ci-dessous). Les bâtiments devraient être achevés pour la fin 2007. Tous les éléments de l'accélérateur devraient être en place à la fin de 2008, ce qui laisse envisager un démarrage début 2009.



Mesures magnétiques des dipôles

Le service accélérateur est impliqué dans la réception et la mesure des dipôles du synchrotron de CNAO.

Leur nombre est de 16 dans l'anneau accélérateur, et de 24 au total répartis sur l'ensemble en incluant les voies de faisceaux. Les tolérances exigées en matière d'homogénéité de l'intégrale de champ magnétique $\Delta B \times L / B \times L \leq 2 \times 10^{-4}$ et de reproductibilité de l'intensité du champ magnétique $\Delta B / B \leq 10^{-6}$ sont d'un niveau jamais atteint pour ce type de machines. Ceci a nécessité la construction d'un nouvel appareil de mesure avec des bobines courbées qui épousent le rayon de la trajectoire idéale des particules (photo ci-dessous).



Les tests du dipôle prototype ont révélé qu'une amélioration de l'isolation électrique entre les tôles était nécessaire (réduction des courants de Foucault), et qu'un retard à l'établissement du champ magnétique rendait indispensable l'utilisation de la technique de « train B »: technique dans laquelle le champ magnétique est mesuré puis régulé en temps dans l'un des dipôles montés en série dans l'anneau. En effet, malgré la qualité inférieure du métal (magnétal bc) par rapport à celle attendue en matière de perméabilité magnétique, des tests réalisés à Grenoble, en collaboration avec Olivier Geoffroy de l'Institut Néel, ont montré que le cycle d'hystérésis est comparable à celui d'un fer doux classique, ce qui a pour conséquence le retard observé dans l'établissement du champ magnétique. Finalement, les mesures d'homogénéité de champ magnétique et de la carte de champ après « shimming » (calage) entrent parfaitement dans les tolérances prévues. Aucun défaut n'ayant été constaté dans l'analyse de la carte de champ du plan médian, l'autorisation de lancer la production de série a été donnée.

Dynamique des faisceaux

Le service accélérateur a travaillé à la détermination des tolérances de fonctionnement de la cavité accélératrice du synchrotron. La tension, de fréquence et d'amplitude variables, appliquée aux bornes de la cavité assure, à chaque tour dans le synchrotron, la capture puis l'accélération des particules du faisceau. La valeur initiale de cette tension a été optimisée avec un code dédié à la dynamique de faisceau longitudinale (ESME) pour minimiser le nombre de particules perdues lors de la phase de capture. Des simulations ont

ensuite été effectuées afin de déterminer l'effet d'un bruit en amplitude, ou en phase sur la tension d'accélération. Ces études ont été réalisées en fonction de la fréquence du bruit appliqué pour identifier les fréquences les plus néfastes, c'est-à-dire générant une large proportion de particules perdues lors des phases de capture et d'accélération du faisceau (> 10 %) et pour proposer des tolérances sur la cavité acceptables pour le fonctionnement de l'accélérateur. Une campagne de mesure des composantes du bruit a montré un très faible niveau de bruit sur la cavité installée pour des tests au CERN (< 1 %). Les simulations, affinées pour prendre en compte le bruit mesuré, ont mis en évidence une dégradation minimale des propriétés du faisceau dans les conditions expérimentales du CERN.

Électronique de pilotage de la cavité accélératrice

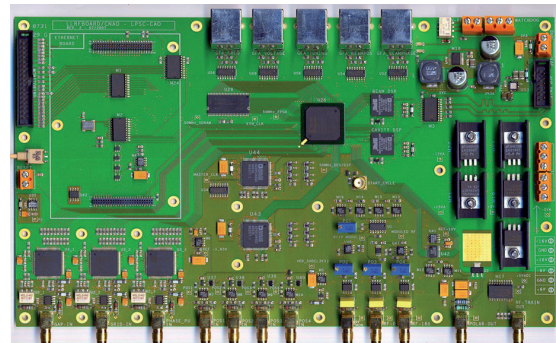
Le rôle de cette électronique est de piloter l'unique cavité accélératrice du synchrotron CNAO à partir des consignes envoyées par le centre de contrôle/commande de l'accélérateur. Les différentes fonctions de cette électronique sont les suivantes :

- Génération d'un signal sinusoïdal de fréquence et d'amplitude variables pour la cavité accélératrice.
- Contrôle du courant de polarisation de la cavité afin de maintenir l'accord de celle-ci aux différents points de fonctionnement.
- Contrôle de la phase et de la position du faisceau dans le synchrotron.
- Interface rapide avec le contrôle/commande CNAO pour l'acquisition des valeurs de la fréquence, du Train B (valeur du champ dans les dipôles), de l'amplitude, du courant de polarisation, de la phase et de la position du faisceau.
- Interface lente avec le contrôle/commande CNAO pour la mise à jour des paramètres et des programmes de l'électronique, l'acquisition des signaux mesuré et le diagnostic.

Après une étude de l'état de l'art dans le domaine, le service électronique s'est orienté vers une solution entièrement numérique pour la réalisation de cette électronique. Différents prototypes ont été réalisés afin de tester les fonctionnalités du générateur de fréquence sinusoïdal, des boucles de contrôle de la cavité et des boucles de contrôle du faisceau.

De nombreux essais ont été effectués en 2006 et début 2007 sur la cavité accélératrice installée provisoirement au CERN et ont permis de valider les différents prototypes réalisés. Le dernier prototype a été testé avec succès fin 2007 sur le booster du PS du CERN afin de valider les boucles de contrôle du faisceau qui ne pourront pas être testées à CNAO avant la fin de la construction du synchrotron. Ce dernier essai a été un succès et a de plus permis d'apprendre beaucoup sur le

fonctionnement réel d'un synchrotron, ce qui sera un atout lors de l'installation de l'électronique à CNAO, probablement au cours de l'année 2008.

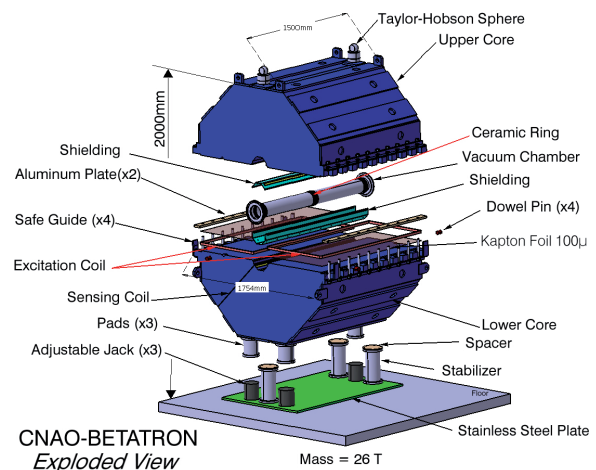


Prototype final de la carte LLRF CNAO.

Aimant bêtaatron d'extraction

Le LPSC est impliqué dans la conception, la réalisation et la fourniture d'un aimant bêtaatron toroïdal utilisé pour l'extraction lente d'un faisceau de particules stockées dans le synchrotron du CNAO. Ce système inductif permet de positionner progressivement le faisceau sur une résonance horizontale de la machine, laquelle conduit à l'accroissement de son rayon et finalement son extraction.

Une maquette de cet aimant a été conçue et délivrée au CNAO début 2006 afin de vérifier les simulations magnétiques (schéma ci-dessous).



À partir des résultats obtenus, et en collaboration étroite avec nos collègues du CNAO et de l'Université de Pavie pour la partie magnétique, la conception de l'aimant bêtaatron final a été finalisée. Sa fabrication a fait l'objet d'un appel d'offre dont le lauréat est la société Sigmaphi. L'aimant est aujourd'hui fabriqué et devrait être livré après vérifications et mesures sur le site du fournisseur, à Pavie, en début d'année 2008. Nous assurons le suivi de fabrication. Une participation à l'installation de l'aimant bêtaatron sur le site du CNAO à Pavie est également prévue.

Projet ANR RACCAM

*François Méot, Johann Collot, Joris Fourier,
Emmanuel Froidefond, Jaroslaw Pasternak*

Le projet RACCAM (Recherche en ACCélérateurs et Applications Médicales) est un projet de recherche sur de nouvelles configurations d'accélérateurs financé par l'ANR sur la période 2006-2008 (http://lpsc.in2p3.fr/service_accelerateurs/raccam.htm). Il réunit 3 partenaires, le LPSC, SIGMAPHI, et le CHU de Grenoble sur trois axes d'activités :

- Collaboration R&D internationale sur les machines circulaires à champ fixe, dont la construction d'EMMA.
- R&D technologique pour la construction d'un aimant secteur spiral à focalisation forte, en collaboration avec SIGMAPHI.
- Applications médicales des synchrotrons à champ fixe, avec design d'une maquette proton dans la gamme 200 MeV.

RACCAM fait l'objet de deux thèses « Design d'aimant spiral pour application à une machine médicale » et « Synchrotrons à champ fixe ». La première court sur 2005-2008, et la seconde, démarrée en octobre 2006, se poursuit en co-tutelle au Japon (Centre d'Études Nucléaires KURRI, Université de Kyoto) depuis octobre 2007.

L'application médicale a motivé l'élargissement de la collaboration RACCAM à trois nouveaux participants, le Centre anti-cancer A. Lacassagne (Centre FNCLCC, Nice), et les constructeurs de cyclotrons AIMA-Développement et IBA (cf. Chapitre Valorisation et Transferts de technologies).

Centre de recherche plasmas-matériaux-nanostructures (CRPMN)

Jacques Pelletier, Ana Lacoste, Stéphane Béchu, Alexandre Bès, Djalila Boudemagh (th), Tito Busani (th), Mathieu Diers (th), Min Koo (th), Louis Latrasse (th), Brice Marty (th), Peter Oving, Marius Rayar, Pascal Sortais, Tan Vinh Tran (th)

The main research axes 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, negative ion beams for neutral injection (ITER project), microelectronics, micro-nanotechnologies, and photon sources. 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 plasmas prennent une part de plus en plus grande dans notre vie quotidienne, soit directement, avec l'éclairage, les écrans plasma, les lampes UV, soit indirectement, avec la fabrication des puces et des supports numériques, la destruction des gaz nuisibles à l'environnement, les traitements de surface (anticorrosion, tribologie, revêtements fonctionnels), pour ne citer que quelques exemples. Ils constituent aussi des outils très précieux pour la recherche fondamentale dans des domaines très divers comme les sources d'ions pour accélérateurs, l'élaboration de matériaux nouveaux, les micro-nanotechnologies, ou encore la stérilisation.

Le plasma est un milieu gazeux au sein duquel sont produites ou activées des espèces (atomes réactifs, radicaux, métastables, ions, électrons, photons) qui n'existent pas dans un gaz composé d'atomes et de molécules dans leur état fondamental. Les plasmas constituent donc des sources d'espèces nouvelles, et c'est à ce titre qu'ils représentent des sujets d'études particulièrement variés et novateurs.

L'utilisation des plasmas à des fins de recherche fondamentale ou à des applications à caractère industriel requiert que soient remplies un certain nombre de spécifications, toujours plus exigeantes, en termes de densité du plasma, d'uniformité, de production sélective d'espèces... ou, tout simplement, de facilité et de souplesse d'utilisation. Dans ce contexte, l'un des défis auquel se heurte toujours la communauté des plasmas est celui de l'extension d'échelle des sources de plasma. C'est précisément pour apporter un élément de réponse à ce défi majeur qu'ont été développés les plasmas micro-onde distribués, objets des études menées depuis 1985 sur ce concept par le groupe plasma du CRPMN.

Nouvelles technologies plasma

Plasmas micro-onde distribués

L'extension d'échelle des plasmas peut être obtenue de manière simple en associant des sources élémentaires de plasma selon des réseaux bi- ou tridimensionnels.

Ce concept est appliqué avec succès aux plasmas multi-dipolaires opérant à basse pression (10^{-2} à 1 pascal) et aux plasmas matriciels opérant à plus haute pression (10 à 10^3 pascal). Dans les plasmas multi-dipolaires, le plasma produit par les sources élémentaires est entretenu par micro-ondes à la résonance cyclotronique électronique (RCE), grâce au champ magnétique fourni par des aimants cylindriques (dipôles). Dans ce cas, le couplage des micro-ondes avec les électrons du plasma est un couplage résonnant. Avec les plasmas matriciels à plus haute pression, le champ magnétique devient inopérant, et le couplage s'effectue par absorption collisionnelle.

Plasmas multi-dipolaires

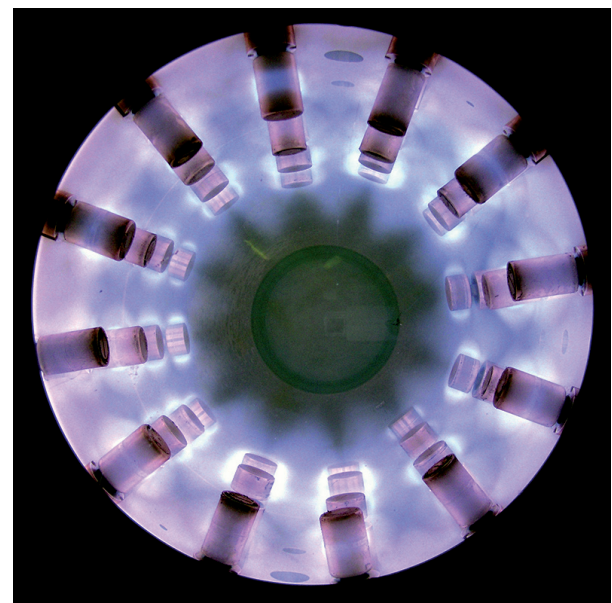


Figure 1: Vue de dessus d'un plasma d'argon produit dans un réacteur multi-dipolaire cylindrique.

Les plasmas multi-dipolaires (figure 1), qui présentent de nombreux avantages par rapport aux générations précédentes de plasmas ECR distribués

(DECR), ont été caractérisés (uniformité, densité, domaines de claquage et de maintien) dans de nombreuses configurations (sources cylindriques, sources planes, maille rectangulaire ou hexagonale) par sonde électrostatique et par spectroscopie d'émission optique. Désormais, les plasmas multi-dipolaires sont utilisés dans de nombreuses applications et les recherches récentes et à venir portent désormais sur l'optimisation et la modélisation des sources élémentaires dipolaires. Des premiers travaux, financés par le projet européen MATECO, ont été effectués dans le cadre de la thèse de T.V. Tran, Maître de Conférence à l'Université de Danang, soutenue en décembre 2006. La modélisation a concerné essentiellement la simulation des configurations de champ magnétique, des cartes de champ micro-onde avec ou sans plasma, l'étude des trajectoires électroniques dans les champs magnétiques, et le chauffage des électrons à la RCE.

Plasmas matriciels

Un réacteur plasma à configuration matricielle plane comportant 4×3 sources micro-onde élémentaires (maille carrée de 3 cm) a aussi été conçu, fabriqué et testé dans le cadre du projet européen MATECO, en vue d'obtenir une nappe de plasma uniforme. Le plasma a été caractérisé par sonde de Langmuir (densité, température électronique, potentiel plasma, uniformité) et par spectroscopie d'émission optique (uniformité, profil de densité). En particulier, les domaines de claquage, de maintien, et d'uniformité du plasma ont été déterminés en fonction de la pression d'argon. Une très bonne uniformité de la nappe de plasma est obtenue pour une distance au plan des sources de l'ordre d'une demi-maille (réseau carré).

Les densités mesurées en plasma d'argon atteignent 10^{12} à 10^{13} cm⁻³ en fonction de la puissance micro-onde. Les valeurs élevées du potentiel plasma s'expliquent par l'augmentation quasi-exponentielle de la température électronique lorsqu'on se rapproche du plan de la source où le champ électrique micro-onde est appliqué. De même, la légère décroissance de la température électronique avec la puissance micro-onde peut s'expliquer par l'apparition d'un mécanisme d'ionisation à deux étapes via les atomes d'argon métastables. La concentration et la température des atomes d'argon métastables Ar(³P₂) ont été mesurées par spectroscopie d'absorption à diodes laser. Les résultats montrent une présence significative de ces métastables avec des concentrations de 10^{10} à 10^{11} par cm³ et des températures variant de 500 à 1300 K en fonction de la pression d'argon et de la puissance micro-onde. Une première modélisation simplifiée 1-D des plasmas matriciels qui s'appuie, d'un côté, sur les équations fluides, et, de l'autre, sur le chauffage des électrons dans un champ micro-onde décroissant suivant l'épaisseur de peau, a été validée dans le cadre de la thèse de L. Latrasse soutenue en novembre 2006.

Sources de plasma élémentaires

Sources à conditions opératoires étendues

Les technologies des plasmas multi-dipolaires et matriciels ont été développées de manière à couvrir des conditions opératoires bien précises, qui sont, d'une part, une fréquence micro-onde $f_0 = 2,45$ GHz, et, d'autre part, les domaines de pressions inférieures au pascal (typiquement, 10^{-2} à 1 pascal en argon) ou supérieures à la dizaine de pascal (typiquement, 10 à 10^3 pascal en argon). Les plasmas multi-dipolaires présentent un fonctionnement optimal aux basses et très basses pressions, où seul le couplage RCE est extrêmement efficace ($\omega_0 = \omega_{ce} \gg \nu$, où ω_{ce} est la pulsation cyclotronique électronique et ν la fréquence de collision élastique électron-neutre), tandis que les plasmas matriciels ont un fonctionnement optimal aux plus hautes pressions, où le couplage par absorption collisionnelle ($\omega_0 \approx \nu$) devient à son tour extrêmement efficace. Il existe donc un domaine de pression, typiquement entre 1 et 10 pascal, où le couplage résonnant à la RCE et le couplage par absorption collisionnelle se trouvent simultanément en dehors des conditions opératoires optimales. L'objectif principal des projets de recherche ANR PLASMODIE (2006-2009) et CIBLE (2007-2008) découle de l'analyse précédente qui montre la difficulté de réaliser des sources capables de produire des plasmas couvrant la gamme de pression intermédiaire.

Pour cela, une première difficulté concerne la configuration des sources élémentaires et en particulier celle du champ magnétique qui doit permettre un couplage optimisé des micro-ondes avec le plasma, notamment lors du passage du mode de couplage RCE au mode de couplage par absorption collisionnelle. Pour cela, un impératif est de rechercher et mettre en œuvre de nouvelles configurations magnétiques qui n'entravent en aucune façon le couplage par absorption collisionnelle des plasmas matriciels, mais qui autorisent en même temps un couplage optimisé du plasma par RCE aux basses pressions. Les solutions proposées ont fait l'objet de deux brevets déposés en 2006. La seconde difficulté concerne le choix de la fréquence du champ électrique micro-onde de maintien du plasma. En effet, pour maintenir un couplage RCE efficace à pression plus élevée, il faut augmenter la fréquence micro-onde en proportion ($\omega_0 = \omega_{ce} \gg \nu$). En revanche, pour maintenir un couplage efficace par absorption collisionnelle à pression plus basse, il faut diminuer la fréquence micro-onde en proportion ($\omega_0 \approx \nu$). Autrement dit, pour maintenir un couplage efficace dans tout le domaine de pression pouvant aller de 10^{-2} à 10^3 pascal, il est impératif de pouvoir faire varier la fréquence des micro-ondes dans un certaine plage, soit vers les fréquences plus hautes (déplacement du couplage RCE vers les hautes pressions), soit vers les fréquences plus basses (déplacement du couplage par absorption collisionnelle vers les basses pressions). Compte tenu de la difficulté de trouver des sources micro-onde au-des-

sus de 2,45 GHz et de leur coût, il est donc préférable de faire varier la fréquence des micro-ondes dans le domaine des fréquences inférieures à 2,45 GHz, par exemple de 100 à 900 MHz. Le développement de générateurs micro-onde à état solide dans cette gamme de fréquence et leur mise en œuvre pour la production de plasmas à conditions opératoires étendues fait l'objet de la thèse de Brice Marty (bourse CIFRE TED 2007-2010).

Contrôle de la FDEE

Les plasmas multi-dipolaires ont été conçus à l'origine pour permettre l'extension d'échelle des sources de plasma et des procédés. Un second défi que ce type de plasma devrait pouvoir relever est celui du contrôle de la FDEE (fonction de distribution en énergie des électrons). En théorie, il suffit de pouvoir moduler le dépiégeage des électrons rapides, accélérés à la résonance cyclotronique électronique (RCE), en dehors de la zone de confinement magnétique, en faisant varier soit l'intensité du champ magnétique, soit la fréquence micro-onde. Cela nécessite, d'une part, de bien comprendre les mécanismes de piégeage et dépiégeage des électrons résultant des modifications des invariants de leur mouvement lors des collisions élastiques et inélastiques, et, d'autre part, de mieux connaître les zones de couplage avec le champ électrique micro-onde et les mécanismes de chauffage des électrons à la RCE, d'où l'intérêt de la simulation numérique pour modéliser finement ces phénomènes (en cours).

Le contrôle de la FDEE dans les plasmas basse pression ouvrirait la voie à un grand nombre d'applications comme: i) la production de densités élevées d'ions H⁺ grâce à la réduction des pertes en volume par détachement électronique (aux très faibles valeurs de T_e); ii) le contrôle de l'énergie du bombardement ionique sans polarisation intentionnelle du substrat ($V_p - V_f$ proportionnel à T_e); iii) l'ionisation des vapeurs atomiques pulvérisées d'une cible (valeurs de T_e élevées), ou encore iii) la production de plasmas (e.g. O₂, N₂, H₂) riches en ions monoatomiques (valeurs de T_e élevées).

Applications des Plasmas

Traitements de surface

Implantation ionique par immersion plasma

L'implantation ionique par immersion plasma (PI³ ou PBII comme plasma-based ion implantation) et son application est une technologie qui permet la modification des propriétés fonctionnelles des surfaces par implantation d'éléments légers comme l'hydrogène, l'azote, l'oxygène ou le fluor. Le réacteur du CRPMN, le premier à avoir été développé et mis en œuvre en France, est l'un des deux ou trois équipements au niveau international capables à l'heure actuelle d'opérer à des énergies de 50 keV, voire au-delà. En 2006, une étude de faisabilité a été consacrée à l'implantation de fluor à partir d'un plasma SF₆ dans divers matériaux

polymères (silicone et polyéthylène haute densité) en vue d'en modifier les propriétés de mouillabilité. Les résultats obtenus et les comportements au vieillissement observés ont pu être expliqués par la co-implantation de soufre et de fluor à partir des ions SF_x⁺ présents dans le plasma.

Dépôts par PAPVD

Une des premières applications des plasmas multi-dipolaires, où une ou plusieurs cibles (cf. figure 2) peuvent être plongées dans le plasma et polarisées indépendamment, a été la pulvérisation assistée par plasma. Cette technique procure de nombreux avantages par rapport à la pulvérisation magnétron: i) usure uniforme des cibles; ii) possibilité de pulvériser des matériaux magnétiques; iii) forte assistance ionique sur le(s) substrat(s) par polarisation indépendante; iv) ionisation des vapeurs atomiques durant le trajet cible-substrat; v) nettoyage simultané des cibles et substrats; vi) pulvérisation réactive sans empoisonnement des cibles (indépendance de la polarisation des cibles). A titre d'exemple, cette technique a permis de déposer aussi bien des couches de nickel par pulvérisation directe que la phase métastable Ni₃N (non magnétique) par pulvérisation réactive.

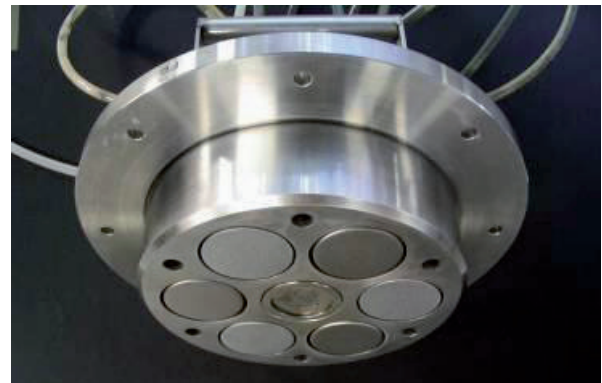


Figure 2 : Photo d'une porte-cibles utilisé en co-pulvérisation assistée par plasma multi-dipolaire.

Au cours des années 2006 et 2007, ce procédé a été utilisé pour élaborer des alliages ou des composés en couches minces de stœchiométrie parfaitement maîtrisée, comme des alliages à mémoire de forme magnétique (e.g. NiMnGa) ou pouvant présenter des capacités calorifiques élevées à basse température. Les résultats obtenus nous ont incités à adopter la technologie pour l'élaboration, l'étude et la caractérisation de matériaux en couches minces à nouvelles propriétés fonctionnelles ou pour la conversion d'énergie. Parmi les matériaux entrant dans cette dernière catégorie, on peut citer, à titre d'exemples non limitatifs, les alliages à mémoire de forme magnétique (changement de forme sous l'effet d'un champ magnétique ou de la température) comme NiMnGa, les matériaux thermo-électriques comme les alliages Ti_{1-x}Sc_xNiSn et TiCo_{1-x}Ni_xSb (création de froid sous l'effet d'une tension électrique),

les matériaux thermo-magnétiques (ou magnéto-caloriques) comme les alliages $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{P}$, FeRh , $\text{Gd}_{1-x}\text{Tb}_x$ et LaFeSi (création de froid sous l'effet d'un champ magnétique). Ce travail est entrepris dans le cadre de la thèse de D. Boudemagh, en co-direction avec le département MCMF (matière condensée, matériaux, fonctions) de l'Institut Louis Néel.

Dépôts par PACVD

Parmi les transferts de technologie envisagés dans le cadre de l'ERT Plasmas HF, les procédés PACVD basse pression utilisant les plasmas multi-dipolaires sont considérés comme particulièrement porteurs par HEF R&D qui a décidé de recruter un doctorant CIFRE, Mathieu Diers, sur ce sujet. Les procédés PACVD pourront être mis en œuvre dans des procédés duplex ou séquentiels associant la PAPVD.



Figure 3 : Photo d'un plasma matriciel d'oxygène.

À plus haute pression (10 à 100 pascals), les performances des plasmas matriciels (figure 3) en termes de densité plasma (10^{11} à 10^{12} cm^{-3} dans l'oxygène) et de concentrations d'espèces réactives permettent d'envisager des applications industrielles aux traitements de surfaces, comme les dépôts par PACVD. Aussi, pour évaluer les capacités des plasmas matriciels en termes de vitesse de dépôt et d'uniformité, des films SiOCH et SiNCH ont été déposés à partir de mélanges de TMS (tétraméthylsilane), précurseur gazeux du silicium, et d'oxygène ou d'azote pour tester leur niveau d'incorporation dans les films. Les vitesses de dépôt obtenus excèdent 1,3 $\mu\text{m}/\text{minute}$ et les films présentent une uniformité meilleure que 5%. La composition des films a été analysée par XPS en fonction des paramètres du procédé. En particulier, dans les plasmas de mélanges contenant de l'azote, les analyses ont montré une incorporation très faible d'azote lorsqu'on utilise N_2 comme précurseur de l'azote, et des concentrations

élevées de liaisons Si- et Si-Si, probablement dues à une forte fragmentation du TMS dans les plasmas matriciels de fortes densités. Ces résultats ont été obtenus lors du travail de thèse de Louis Latrasse effectué dans le cadre du projet MATECO.

Micro-nanotechnologies

Diélectriques de grille

Les plasmas multi-dipolaires ont été utilisés pour élaborer par PACVD ou PAPVD des diélectriques à forte permittivité comme les oxydes d'alliages binaires à base de métaux de transition ou de terres rares (LaAlO_3 ou certaines phases des oxydes $\text{Si}_x\text{Ti}_y\text{O}_2$) pour application en microélectronique (oxydes de grille). Ce travail a été effectué au Laboratoire des Matériaux Avancés de l'Université du Nouveau-Mexique à Albuquerque (USA), qui dispose d'un réacteur multi-dipolaire, dans le cadre de la thèse de T. Busani. Cette thèse en co-direction a été soutenue au LPSC en septembre 2006. Le travail a essentiellement porté sur la relation entre paramètres de dépôt et propriétés physico-chimiques des oxydes (propriétés structurales, polarisabilité du matériau, volume moléculaire, nature des interfaces) et leurs propriétés fonctionnelles (permittivité diélectrique, indice de réfraction).

Gravure plasma : nouveaux procédés de gravure anisotrope

Les procédés de gravure plasma utilisés actuellement en microélectronique et nanotechnologies présentent un certain nombre de limitations en termes de sélectivité, d'anisotropie, d'effets bi-dimensionnels et de compatibilité chimique. Ainsi, les procédés de gravure basés sur des gaz fluoro-carbonés (gravure sélective de SiO_2 par rapport au Si, procédé Bosch) nécessitent ensuite de recourir à des procédés par voie humide pour éliminer les couches de passivation. La mise au point de nouveaux procédés réclame donc d'imaginer des approches inédites, basées nécessairement sur une connaissance approfondie des mécanismes réactionnels sur les surfaces. Un premier procédé de gravure anisotrope des polymères par passivation latérale contrôlée est actuellement en développement (demande de dépôt de brevet en cours). D'autres procédés sont étudiés dans le cadre de la thèse de M. Koo qui a entamé en 2005 un travail de recherche à caractère fondamental sur la gravure plasma et en particulier sur sa modélisation. Les résultats obtenus seront ensuite appliqués à la réalisation de filtres. L'objectif de cette étude, financée par la région Rhône-Alpes, est la réalisation de gravures anisotropes profondes dans des films polymère ou des feuilles métalliques de 10 à 20 μm d'épaisseur pour la réalisation à bas coût de filtres pour micro- ou nanofiltration.

Sources d'ions H^- (ITER)

L'injection de neutres (IDN) à base d'ions négatifs D^- constituera le mode de chauffage principal d'ITER avec plus de 2×17 MW de puissance de neutres D^0

à une énergie de 1 MeV qui seront couplés au plasma. Chaque système IDN comprend, entre autres, une source d'ions négatifs D^- de grandes dimensions (1280 orifices d'extraction disposés sur 1 m^2 pour une surface effective d'extraction de $0,2 \text{ m}^2$), suivi d'une cavité d'accélération, puis d'une cellule d'échange de charge (transformation des D^- en D^0). La source qui sera retenue devra atteindre des performances jusqu'à présent inégalées, comme par exemple produire de fortes densités de courant d'ions négatifs (plus de 200 A/m^2 , ou 20 mA/cm^2) avec une homogénéité de $\pm 5 \%$.

La participation du CRPMN à ce projet résulte d'une collaboration initiée en 2002 avec le LPTP (laboratoire de physique et technologie des plasmas) de l'École Polytechnique dans le but de tester les sources plasmas multi-dipolaires en remplacement des sources par filaments pour la production en volume d'ions D^- . En raison des cessations d'activité intervenues au LPTP, de la place des sources d'ions au LPSC, et aussi de l'intérêt des sources d'ions D^- ou H^- pour ITER et les accélérateurs (protonthérapie), il a été décidé d'un commun accord de transférer la source d'ions H^- du LPTP au LPSC avec tous ses moyens d'extraction et de diagnostic des ions H^- (photodétachement laser et sonde de Langmuir). Le transfert a été réalisé fin 2006 et le banc expérimental est à nouveau opérationnel depuis mi-2007 (figure 4).



Figure 4: Photo de la source d'ions H^- et du laser Nd-Yag pour les diagnostics par photodétachement.

Au cours des dernières années, il a été observé expérimentalement que le taux d'ions négatifs H^- mesuré dans le volume du plasma dépendait fortement de la nature des parois du réacteur. Aussi, dans le projet ITER-NIS qui sera soumis à l'ANR début 2008, l'objectif du CRPMN est, d'une part, d'identifier les différents mécanismes de création et de perte sur les surfaces ayant une influence directe sur le taux d'ions négatifs H^- en volume, et, d'autre part, de rechercher les matériaux conduisant à une production d'ions négatifs plus élevée.

Sources de photons

Les études sur les sources de photons utilisant des décharges micro-onde constituent, depuis fin 2007, un nouvel axe de recherche pour le CRPMN, dans le prolongement des efforts qui ont mené à la création en janvier 2006 de la start up RC-Lux (sources UV pour stérilisation de l'eau). Désormais, l'objectif est de développer de nouvelles sources de photons basées sur les concepts mis en œuvre dans le projet ANR PLASMODIE, à savoir, des sources élémentaires alimentées par des générateurs micro-onde à état solide de faible puissance.

Stérilisation plasma

Cette thématique initiée dès 1991 par le Laboratoire de Pharmacie Clinique et des Biotechnologies du CHU-Université Joseph Fourier et Metal Process, s'est poursuivie depuis cette date dans le cadre de nombreuses collaborations pluridisciplinaires régionales et internationales (Centre de Recherche du Service de Santé des Armées / CRSSA, projet européen Steriplas 2000-2003, Université de Montréal). Ces études fondamentales sur la stérilisation plasma ont abouti en particulier à identifier les agents (UV, atomes, radicaux) et les mécanismes d'inactivation des micro-organismes (destruction de l'ADN par les UV, érosion chimique par les radicaux) dans les décharges et les post-décharges et, tout récemment, la mise en évidence d'effets de synergie entre inactivation UV et température. Ces recherches se poursuivent dans le cadre du LIA-LITAP, grâce en particulier à une meilleure coordination des projets français et québécois.

