

Recherches pluridisciplinaires

Applications médicales

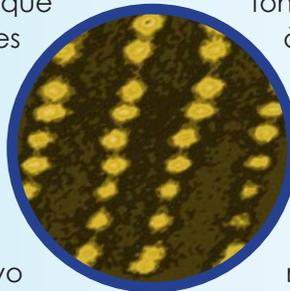
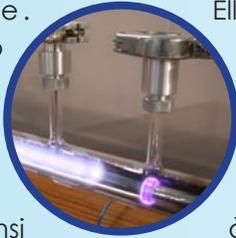
Indépendamment de ses progrès constants, la médecine bénéficie depuis la fin du 19^{ème} siècle du fruit des recherches menées en physique expérimentale, grâce aux équipes de recherche situées à l'interface de ces deux disciplines. Le LPSC de Grenoble participe à cet effort à travers deux projets qui illustrent parfaitement les axes sur lesquels la physique peut contribuer à la médecine :

- le diagnostic, par des techniques d'imagerie non invasives,
- la thérapie, par l'utilisation de faisceaux d'ions, eux aussi non invasifs.

Notons qu'indirectement les outils de diagnostic in vivo participent également aujourd'hui de façon cruciale à la recherche médicale.

Ainsi, depuis quatre ans, la tomographie par émission de positons (TEP) fait l'objet des recherches de l'équipe Interface Physique-Médecine. Cette équipe travaille au développement d'un prototype de microtomographe à émission de positons (μ TEP) à xénon liquide et de son électronique.

Elle a pris part également à l'effort international de simulation dédiée aux applications médicales, utilisant son expertise en la matière issue de la physique des particules (en particulier le 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.

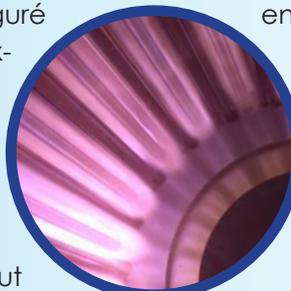


Le Service des Accélérateurs du LPSC participe depuis 2000 aux études techniques pour la création d'instruments destinés au traitement des tumeurs cancéreuses par irradiation avec des ions légers. Il s'est impliqué dans l'avant-projet technique du synchrotron du projet ETOILE (Espace de Traitement Oncologique par Ions Légers Européen) de la région Rhône-Alpes, et a apporté aussi son expertise aux projets équivalents italien (Pavie) et allemand (Heidelberg) afin d'aider les prises de décisions concernant ETOILE.

Physique des plasmas

Concrétisant la volonté du CNRS et de l'Université Joseph Fourier de réunir en un lieu unique sur le Polygone Scientifique les efforts de recherche dédiés à la physique des plasmas froids, le LPSC a accueilli en 2005 le groupe Plasma du laboratoire d'Elaboration par Procédés Magnétiques de Grenoble, et inauguré en mai de la même année le Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures (CRPMN). Les principaux axes de recherches du CRPMN portent sur l'implantation ionique par immersion plasma, ainsi que sur l'étude des plasmas micro-onde distribués et leurs applications à divers traitements de surface.

La création d'une équipe de recherche technologique (ERT) avec la société HEF R&D a été approuvée tout récemment par le ministère; celle d'un Laboratoire International Associé regroupant des laboratoires grenoblois (dont le CRPMN) et québécois impliqués dans le développement et la mise en œuvre de technologies plasma innovantes est en bonne voie. ■



Crédit photos C. Favro

Groupe Interface Physique-Médecine

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

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 informations. 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) 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 profondeur d'interaction, et également sur la simulation Monte-Carlo pour l'imagerie nucléaire. Il y a par ailleurs une forte demande du milieu médical afin de réduire les temps (souvent prohibitifs) de reconstruction d'images.

Ces trois thèmes sont traités au LPSC, par le développement d'un microTEP à xénon liquide ainsi que son électronique dédiée, 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 imager le métabolisme en glucose ou le débit sanguin. Le glucose peut par exemple être utilisé pour imager 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 photomultiplicateurs. 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, etc.) chez l'homme, les animaux et les petits animaux (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

Le LPSC s'est engagé dans l'étude d'un prototype de microTomographe à Emission de Positons (μ TEP) au xénon liquide, dont les propriétés de scintillation sont remarquables par sa rapidité (environ 30 ns) et par son intensité, meilleure que celle du NaI, 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 cellules de xénon liquide disposées axialement. Chaque cellule a une longueur de 50 mm et une section de $2 \times 5 \text{ mm}^2$. 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 par des photomultiplicateurs à localisation (PSPMT), qui délivrent directement la localisation dans le plan radial (x et y) alors que la comparaison des signaux de ces deux PSPMT permet d'accéder à la troisième coordonnée z. Les simulations montrent que ce concept permettrait une nette amélioration de la résolution par rapport aux μ TEP existants, basés sur des cristaux solides. Un module prototype (Figure 1) de section $20 \times 20 \text{ mm}^2$ a été construit, contenant 10 puis 40 cellules. Les photons VUV sont collectés dans 2 PSPMT (prototypes Hamamatsu). Les tests ont été effectués avec une source alpha placée à une extrémité, puis avec une source de ^{22}Na ($\beta^+ \rightarrow 2 \times 511 \text{ keV}$). Les gammas sont alors détectés dans le xénon en coïncidence avec un détecteur Lyso placé à l'extérieur du cryostat. L'objectif de localisation de ces gammas dans un plan transverse a été atteint, comme on le voit sur la figure 2 qui illustre la bonne séparation des guides en x, y. La mesure de résolution en z s'est avérée plus délicate (Figure 3). La résolution est largement tributaire du nombre de photoélectrons détecté par chaque photomultiplicateur et donc de paramètres tels que la pureté du xénon, le coefficient de réflexion des guides et l'efficacité de collection de lumière UV. Cette collection de lumière peut être sensiblement améliorée en supprimant des interfaces optiques et donc en immergeant les photodétecteurs dans le xénon. Les photodiodes à avalanche (APD) qui présentent une efficacité quantique supérieure à celle des photomultiplicateurs peuvent, de plus, être produites sans fenêtre d'entrée ce qui dans le cas où le détecteur est immergé réduit au minimum le nombre d'interface. Une telle diode peut atteindre une QE proche de 100% à la longueur d'onde considérée. Il faut néanmoins noter qu'il n'existe pas, sur catalogue, d'APD dont les caractéristiques correspondent à l'ensemble de nos besoins : surface active, pixellisation, sensibilité dans le VUV et donc de nombreuses interactions sont nécessaires avec les fabricants. Les tests de différentes APD se sont déroulés durant l'année 2005 principalement dans le but d'appréhender ce type de photodétecteur et de caractériser les besoins en électronique de lecture. Ces tests, effectués à température ambiante et à -40° C dans une enceinte thermostatée, ont permis de faire des mesures de courant d'obscurité, de gain ainsi que de résolution en utilisant une LED et une source de ^{55}Fe (X de 5,9 keV en détection directe). Des APD ont finalement été retenues pour être testées avec le xénon liquide, elles ont été livrées en décembre 2005. Il s'agit de diodes sans fenêtre de 16 mm de diamètre et d'une efficacité quantique proche de 100% à 178 nm. Les contraintes mécaniques, dues à la température, étant incompatibles avec les boîtiers proposés dans la version catalogue, ces diodes ont été commandées sous deux formes : puce nue et puce montée sur un support en céramique. L'électronique de lecture comprendra un préamplificateur de charge discret situé dans le cryostat au plus près de la diode et une chaîne de spectrométrie associée à un détecteur de crête située à température ambiante.

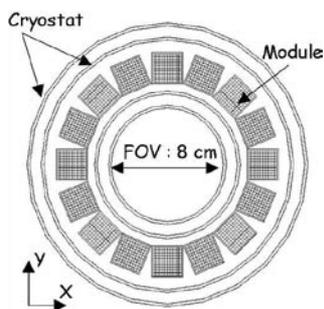


Figure 1: Coupe transaxiale du μ PET LXe.

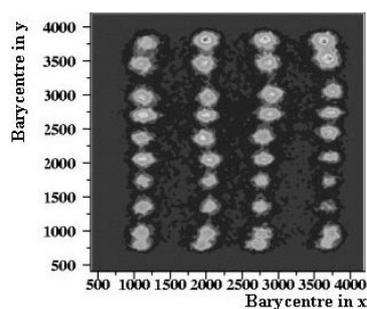


Figure 2: Localisation en x et y en utilisant les guides de lumière $2 \times 5 \text{ mm}^2$.

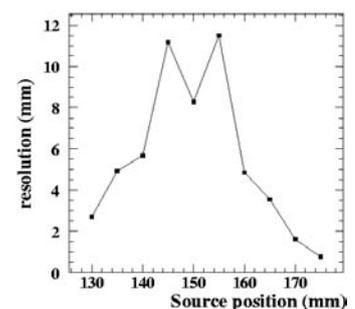


Figure 3: Résolution suivant z en fonction de la position de la source.

◆ Électronique dédiée

On projette de placer l'électronique de traitement (localisation, marquage en temps, conversion analogique numérique) dans le cryostat à température du xénon liquide puis de transmettre les données à un système d'acquisition placé à température ambiante. Les caractéristiques de l'électronique chargée de la localisation (mesure de charge) étant étroitement liées au choix des photodétecteurs, l'étude d'un Convertisseur Temps Numérique (CTN) a débuté en 2004. Ces circuits ont été réalisés en utilisant la technologie CMOS $0,35 \mu\text{m}$ de la société AMS (Austria Mikro Systeme). Ils permettent le marquage en temps des interactions par rapport à une horloge de référence commune aux 16 modules prévus dans le μ TEP. Les tests qui se sont déroulés durant le premier

trimestre 2005 ont permis de vérifier les performances du circuit. Une résolution de 244 ps et une non linéarité différentielle inférieure à $\pm 20\%$ ont été obtenues sur une gamme de température allant de 80⁰ C à -120⁰ C.

◇ 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, indispensables 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 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 public. À la suite de ce développement, l'équipe du LPSC a intégré la collaboration internationale OpenGATE. Plus de 20 laboratoires européens (EPFL, IN2P3, DAPNIA, INSERM...), nord-américains (UCLA, MSKCC-New York, Umass-Worcester...) et asiatiques (Samsung Medical Centre-Séoul) participent à cette collaboration. L'objectif à moyen terme était le développement d'une plateforme de simulation Monte-Carlo basée sur GEANT4 pour l'imagerie nucléaire (PET, SPECT...) dont la distribution a été rendue publique sous licence GNU. Dans ce cadre, le LPSC est impliqué à la fois sur des aspects de validation (comparaison avec GePEToS), et sur des aspects de développement orientés vers les nouvelles générations de détecteurs TEP. De plus, le laboratoire a pris la responsabilité du groupe de travail en charge de la documentation liée à la distribution publique.

Par rapport aux autres logiciels Monte-Carlo utilisés en imagerie médicale nucléaire, GATE apporte la flexibilité de GEANT4 en matière de paramétrisation de la géométrie et des processus physiques tout en cachant la complexité d'utilisation de GEANT4 derrière une interface utilisateur conviviale. S'y ajoutent des modules très originaux introduisant la dimension temporelle dans la simulation comme la gestion de la décroissance radioactive, du mouvement des sources et des équipements de détection, ainsi que le temps mort de l'acquisition. L'utilisation de GEANT4 permet également de profiter de la pérennité de ce code développé au CERN, ainsi que sa validation sur de très nombreuses expériences de physique des particules.

Le code source a fait l'objet d'une diffusion publique le 1^{er} mai 2004 sous licence LGPL et a été accompagné d'un article de référence dans *Physics in Medicine and Biology*.

Le projet a été mené à son terme et aujourd'hui, un peu plus d'un an après sa diffusion publique, GATE est utilisé par plus de 450 personnes dans le monde. Il est en train de devenir la référence dans le domaine de l'imagerie nucléaire (PET et γ -caméra), un outil indispensable au développement et à la comparaison des projets de nouvelles caméras.

◇ Architectures 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 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 calcul à effectuer se prête bien à une parallélisation de ces derniers, le calcul d'un pixel image pouvant 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 Power PC, 128 unités « MAC » et plusieurs dizaines de milliers de cellules logiques) ainsi que plusieurs centaines de méga-octets de mémoire par SoPC (nous utiliserons des barrettes de mémoires analogues à celles utilisées dans les PC portables) est en cours de conception. 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.

Projet ETOILE d'hadronthérapie par ions carbone

J.-M. De Conto, J. Collot.

IN2P3, CEA-DSM, Universités C. Bernard Lyon1 et J. Fourier.

Additional expertises and technical studies have been done for ETOILE. The project has been decided in May 2005.

La décision de réaliser le projet ETOILE (Espace de Traitement Oncologique par Ions Légers Européen) a été annoncée par le Ministre de la Santé en mai 2005. En parallèle aux très importantes études médicales et médico-économiques menées par des médecins de la Région Rhône-Alpes, un avant-projet technique de synchrotron médical avait été mené entre mi 2000 et début 2002 au sein d'une collaboration UCBL/CEA-DAPNIA/IN2P3, et coordonnée par le LPSC. Il se basait sur les projets similaires prévus pour Heidelberg (Allemagne) et Pavie (Italie). Ces deux centres sont actuellement en construction.

Courant 2003, des études techniques complémentaires ont été entreprises par la collaboration.

D'une part, une expertise poussée des deux projets italien et allemand a été réalisée pour déterminer si l'une des deux solutions présentait un avantage certain, et pour aider les prises de décision de la direction d'ETOILE. Il a été conclu qu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux projets, qui diffèrent uniquement au niveau du synchrotron, et qui ont de nombreux sous-systèmes communs.

D'autre part, des compléments d'études ont été menés pour affiner le coût (notamment, une étude plus détaillée du système de tête rotative isocentrique), ainsi que pour prédéfinir des scénarios de réalisation, et qui comportent les moyens humains requis ainsi que les plannings. Une solution industrielle a été envisagée, pour le cas où les projets en cours de réalisation seraient valorisés (commercialisation par un industriel, mise en place d'un consortium, etc.), mais également un scénario plus classique de réalisation d'accélérateur.

Un document définitif a été rendu en septembre 2004 (projet ETOILE : dossier pour la création d'un pôle national d'hadronthérapie par ions légers, Université Claude Bernard Lyon1, IPNL, F69622 Villeurbanne CEDEX)



LE CRPMN

J. Pelletier, A. Lacoste, S. Béchu, A. Bès, J. Sirou, F. Fabiano, D. Vempaire (th), T. V. Tran (th), L. Latrasse (th), T. Busani (th).

At the beginning of 2005, the decision to create the Research Center for Plasmas-Materials-Nanostructures (CRPMN) was taken in order to gather at LPSC most of the plasma researchers in Grenoble involved in the development of plasma technologies. The main research axes at CRPMN are: 1) plasma-based ion implantation (PBII) up to 50 keV to implant light elements in materials in order to modify surface properties of bulk materials and electronic or magnetic properties of thin films; 2) plasma scaling up via the distribution of elementary microwave plasma sources on networks, i.e. matrix plasmas sustained by microwaves in the medium pressure range and multi-dipolar plasmas in the low-pressure range by using ECR; 3) fundamental studies on plasma etching; 4) external collaborations in the fields of H- ion sources, plasma characterization, and sterilization.

La création du CRPMN dans le cadre du LPSC résulte d'un certain nombre de constats et de la volonté de l'UJF et du CNRS de réunir en un lieu unique, sur le Polygone Scientifique, les principales équipes du site grenoblois développant des technologies plasma en y accueillant le groupe Plasma de EPM (directeur J. Pelletier). Les travaux de réhabilitation du hall du bâtiment B4, destiné à accueillir le futur CRPMN et financés principalement par le département SPI du CNRS, ont été achevés en deux mois. Les équipements plasma transférés étaient à nouveau opérationnels pour la journée portes-ouvertes et l'inauguration du CRPMN, en mai 2005, en présence des autorités de tutelle. Avec le recul actuel, on peut affirmer que cette opération est un succès.

◆ Implantation ionique par immersion plasma

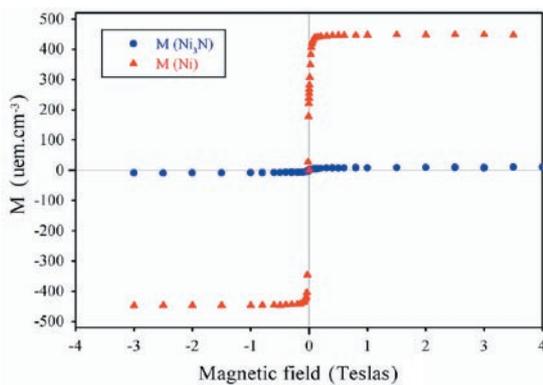


Figure 1: Cycle d'hystérésis d'une couche de nickel (▲) et de la phase Ni_3N (●) obtenue après implantation d'azote.

la couche superficielle implantée (transition métal-diélectrique pour Al, et semiconducteur-diélectrique pour Si). À noter, l'intérêt de la technique pour élaborer des nitrures de silicium exempts d'hydrogène. Enfin, l'implantation d'oxygène et de fluor (en cours) dans les polymères modifie durablement les propriétés de mouillabilité des polymères.

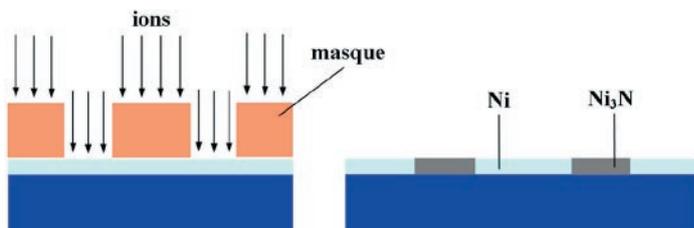


Figure 2: Réalisation de nanostructures magnétiques par implantation ionique par immersion plasma.

L'implantation ionique par immersion plasma et son application est une technologie en émergence 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 particulier, il a permis de réaliser des implantations d'azote dans Fe et Ti, pour lesquelles les doses et profils d'implantation ont été mesurés et comparés aux résultats de la simulation (logiciel SRIM). En outre, des implantations d'azote ont été effectuées dans Al et Si avec des doses suffisantes pour élaborer en surface des couches diélectriques, réalisant ainsi des transitions des propriétés électroniques de

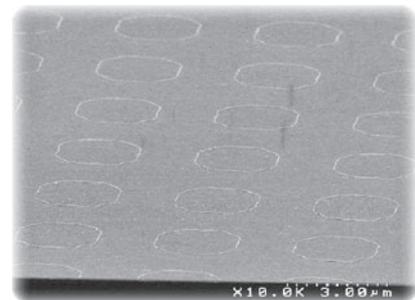


Figure 3: Photographie au MEB montrant des îlots non magnétiques de nitrure de nickel Ni_3N dans une couche de nickel obtenus par implantation ionique d'ions azote à travers un masque de résine.

Plus récemment, des travaux portant sur la modification des propriétés magnétiques des couches minces ont été effectués dans le cadre de la thèse de D. Vempaire. L'implantation d'azote dans Ni permet de transformer ce matériau ferromagnétique en Ni_3N , matériau non magnétique (Figure 1). À l'inverse, l'implantation d'azote dans Mn permet de transformer ce matériau antiferromagnétique en Mn_4N , matériau ferrimagnétique. Il est donc possible, par cette voie (brevet CNRS en cours de dépôt), de réaliser des nanostructures magnétiques (Figures 2 et 3) applicables, à titre d'exemples, au stockage de l'information (mémoire MRAM) ou à la fabrication de capteurs.

◆ 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 Pa). 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

Les plasmas multi-dipolaires (Figure 4), 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 actuelles portent désormais sur l'optimisation et la modélisation des sources élémentaires di-polaires. Ce travail est effectué dans le cadre de la thèse de T. V. Tran (financement par le projet européen MATECO). La modélisation concerne la mise en œuvre de nouvelles configurations de champ magnétique, la carte de champ micro-onde avec ou sans plasma, l'étude des trajectoires électroniques dans les champs magnétiques (Figure 5), et le chauffage des électrons à la RCE (Figure 6).



Figure 4: Plasma d'argon dans un réacteur multi-dipolaire cylindrique.

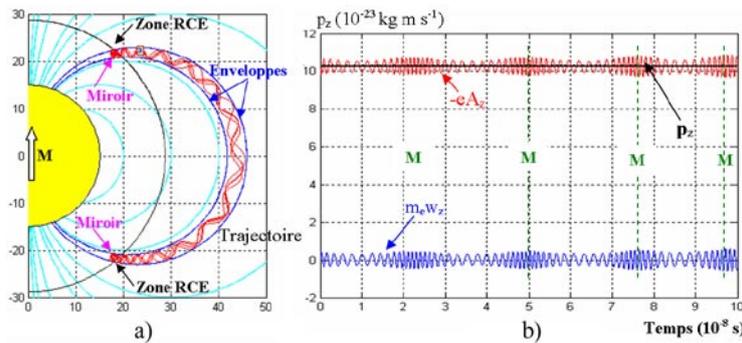
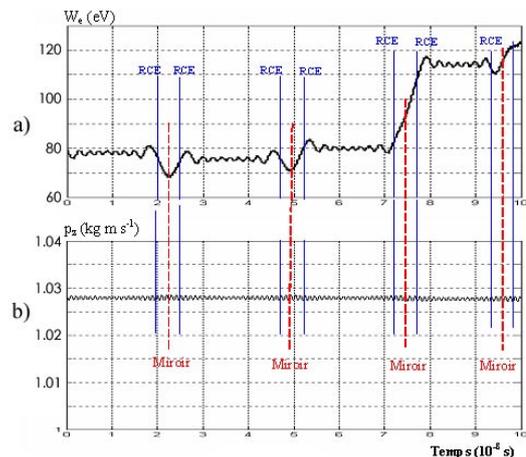


Figure 5: Trajectoire d'un électron soumis au champ magnétique dipolaire d'un aimant cylindrique de longueur infinie (selon Oz) et d'aimantation diamétrale (a), et évolution des 2 invariants du mouvement, énergie cinétique W_e et quantité de mouvement généralisée $p_z = m_e w_z - eA_z$ (b).

Figure 6 (à droite): Évolution, le long de sa trajectoire, a) de l'énergie cinétique W_e , et b) de la quantité de mouvement généralisée ($p_z = m_e w_z - eA_z$) d'un électron :
 - soumis au champ magnétique dipolaire d'un aimant cylindrique de longueur infinie et d'aimantation diamétrale ;
 - accéléré à la RCE (résonance cyclotronique électronique) par un champ électrique micro-onde se propageant le long de l'aimant (parallèle à Oz).



Applications des plasmas multi-dipolaires

Dépôt par PACVD et PAPVD et gravure. Les plasmas multi-dipolaires peuvent être utilisés dans de nombreuses opérations de traitements de surfaces, comme la gravure ou le dépôt de couches minces par PACVD (CVD assisté par plasma), comme les dépôts de type $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ à partir de TMS (tétraméthylsilane) et d'oxygène (projet européen MATECO). Mais l'application de prédilection concerne essentiellement les dépôts par pulvérisation assistée en plasma multi-dipolaire dans lesquels une ou plusieurs cibles peuvent être plongées dans le plasma et polarisées indépendamment. Les principaux avantages de cette technique par rapport à la technologie magnétron sont :

- usure uniforme des cibles ;
- possibilité de pulvériser de matériaux magnétiques ;
- forte assistance ionique sur le(s) substrat(s) par polarisation indépendante ;
- ionisation des vapeurs atomiques durant le trajet cible-substrat ;
- nettoyage simultané des cibles et substrats ;
- pulvérisation réactive sans empoisonnement des cibles (indépendance de la polarisation des cibles).

À titre d'exemple, cette technique a permis de déposer aussi bien des couches de nickel par pulvérisation directe que la phase métastable Ni_3N (non magnétique) par pulvérisation réactive (thèse de D. Vempaire).

Procédés duplex PACVD et PAPVD. La flexibilité des plasmas multi-dipolaires, a permis d'élaborer des matériaux par des procédés duplex associant PACVD et pulvérisation assistée par plasma micro-onde. Ainsi, des nanocomposites cuivre-carbone en couches minces ont été obtenus par pulvérisation de cuivre et dépôt simultané de carbone par PACVD à partir de CH_4 ou C_2H_2 . À Albuquerque (Université du Nouveau-Mexique), de tels procédés duplex sont utilisés pour élaborer des oxydes de grille (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 $\text{Si}_x\text{Ti}_y\text{O}_2$). Ce travail est mené dans le cadre de la thèse de T. Busani et de R. Devine (Université du Nouveau Mexique).

Plasmas micro-onde matriciels

Principe et caractérisation des plasmas matriciels. Un réacteur plasma à configuration matricielle plane comportant 4×3 sources micro-ondes élémentaires (maille carrée de 3 cm) a été conçu, fabriqué et testé en vue d'obtenir une nappe de plasma uniforme (Figure 7). 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 performances des plasmas matriciels en termes de densité plasma (10^{12} à 10^{13} cm^{-3} dans l'argon), dans un domaine de pression (10 à 100 pascals) où des concentrations d'espèces réactives et des flux de photons élevés sont générés, permettent d'envisager des applications industrielles aux traitements de surfaces (enlèvement des résines avec les plasmas d'oxygène, désoxydation des métaux, dépôts par PACVD) et, éventuellement, à l'éclairage.

Modélisation des plasmas matriciels. Une première modélisation simplifiée 1D des plasmas matriciels qui s'appuie, d'un côté, sur les équations des fluides, et, de l'autre, sur le chauffage des électrons dans un champ micro-onde décroissant suivant l'épaisseur de peau, est en cours de validation. L'ensemble de cette étude de modélisation se poursuit actuellement dans le cadre de la thèse de L. Latrasse (financement MATECO).

Lois d'échelle des micro-décharges. Du côté des décharges de faibles dimensions, la faisabilité du maintien du plasma par micro-ondes dans des cellules de dimensions sub-millimétriques a été étudiée expérimentalement. Les courbes de Paschen obtenues avec divers gaz rares (Ar, Kr, Xe) ont permis ensuite, à partir d'une étude numérique, de définir les lois d'échelle de ces plasmas. Cette étude a permis aussi de montrer la faisabilité d'un nouveau concept d'écrans plasma où le plasma est maintenu par micro-ondes, tout en conservant la technique traditionnelle d'adressage des cellules.



Figure 7: Photos d'un plasma matriciel d'argon vu de face :

en haut, à faible puissance micro-onde, les plasmas produits par chaque source élémentaire restent localisés près des applicateurs micro-onde ;

en bas, à forte puissance micro-onde, les plasmas produits par chaque source élémentaire se rejoignent pour former une nappe de plasma uniforme.

◆ Nouveaux procédés de gravure anisotrope

Études fondamentales de gravure plasma

Les procédés de gravure plasma utilisés actuellement en microélectronique et pour les micro-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 SiO₂ 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 Min Koo qui a entamé en 2005 un travail de recherche à caractère fondamental sur la gravure plasma et en particulier sur sa modélisation.

◆ Application à la réalisation de filtres pour micro-nanofiltration

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. À l'heure actuelle, la gravure anisotrope de pores de diamètre 2 µm dans des films polymère d'épaisseur 12 µm a été réalisée par un procédé plasma utilisant la passivation latérale contrôlée. Des masques durs en AlN ont aussi été réalisés par implantation ionique d'azote dans Al en immersion plasma, et leur vitesse d'érosion sous bombardement ionique mesurée expérimentalement en plasma de mélange Ar/SF₆. Ces travaux ont été effectués en collaboration avec Metal Process et Orelis (leader en France et en Europe dans le domaine de la fabrication de filtres) dans le cadre du DRT de R. Ciron (novembre 2004).

◆ Collaborations externes

Sources d'ions H-

Cette collaboration avec le LPTP de l'École Polytechnique a été initiée en 2002 par M. Bacal et Y. Arnal dans le but de tester les sources de plasma multi-dipolaires en remplacement des sources par filaments pour la production en volume d'ions H-. Les densités d'ions H- sont mesurées par photodétachement laser et sonde électrostatique. Les performances atteintes s'étant très rapidement avérées comparables à celles obtenues à partir des sources à filaments, cette collaboration s'est poursuivie par une comparaison des densités d'ions H- en mode continu et en mode pulsé. Les résultats expérimentaux ont montré que les densités obtenues en mode pulsé peuvent atteindre le double de celles obtenues en mode continu.

En raison de la cessation d'activité prochaine de M. Bacal au LPTP, la question de la poursuite de cette thématique, soit au LPTP, soit au CRPMN, est posée.

Diagnostics par sonde électrostatique dans les plasmas collisionnels

Cette seconde collaboration avec le LPTP, plus récente, concerne des études menées avec A. Rousseau sur les mesures par sonde électrostatique dans les plasmas collisionnels. En effet, les hypothèses généralement admises pour les mesures de sonde en plasma à basse pression ne sont plus valides dans les plasmas très collisionnels, d'où la nécessité de comprendre comment évoluent les caractéristiques I(V) lorsque la pression augmente. Cette problématique prend tout son sens dans la mesure où de nombreux procédés plasma glissent vers le domaine des pressions intermédiaires (mbar et au-dessus).

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. Ces recherches devraient pouvoir se poursuivre et se développer dans le cadre du LITAP grâce en particulier à une meilleure coordination des projets français et québécois.

◆ Projets

Une première demande d'Équipe de Recherche Technologique avec la société HEF R&D (ERT *Plasmas HF*) a été approuvée par le Ministère et sera opérationnelle en 2007 avec le démarrage du contrat quadriennal. De plus, il est envisagé que l'activité plasma développée actuellement dans le cadre du partenariat LPSC - Techmeta se poursuive à partir de fin 2006 avec le CRPMN.

La création d'un laboratoire international associé (LIA), regroupant des laboratoires grenoblois et québécois fortement impliqués dans le *développement et la mise en œuvre de technologies plasma innovantes* a été déclenchée début 2006. Ce LIA permettra la mise en commun de grandes infrastructures très coûteuses existantes ou à construire.

Le projet scientifique du CRPMN pour les années qui viennent comprend la modélisation des plasmas multipolaires, leur application aux micro-nanotechnologies, la modélisation et les applications des plasmas micro-ondes matriciels, et enfin le développement de nouvelles sources plasma à conditions opératoires étendues.



Crédit photo C. Favro