

# Recherche Interdisciplinaire

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

En 2009 a été initiée une collaboration entre le LPSC et le service de radiothérapie du CHU de Grenoble, (INSERM U836, équipe 6, Grenoble Institut Neurosciences) pour le développement et la mise au point d'un détecteur de mesure des caractéristiques d'un faisceau de rayons X, utilisé pour le traitement des cancers. La radiothérapie conventionnelle utilise des faisceaux de photons X, jusqu'à 25 MeV, pour irradier en profondeur les tissus cancéreux. Dans ce domaine en constante évolution, l'utilisation de collimateurs multilames permet de conformer la forme du faisceau conique à celle de la tumeur. Plus récemment, le collimateur multilames sert aussi à moduler dynamiquement l'intensité du faisceau afin que l'énergie déposée dans les tissus cancéreux soit la plus uniforme possible, tout en épargnant les tissus sains environnants. La position des lames qui bougent au cours du temps va suivre la prescription du *programme de planification de traitement*, utilisé en clinique pour modéliser le dépôt de dose dans les tissus d'après les clichés anatomiques. Cette nouvelle technique est beaucoup plus sensible à des écarts entre la position planifiée et la position effective des lames. Le groupe DAME (Développement et applications pour le Médical) a initié le développement d'un détecteur gazeux à transmission pour le contrôle en temps réel de la position des lames, en mettant l'accent sur la transparence (mesurer en atténuant au minimum le faisceau), la résolution spatiale (de l'ordre du millimètre au point de prescription du dépôt de dose), la simplicité de mise en œuvre, et la tenue dans le temps à l'irradiation intense.

L'activité du groupe Plasmas-Matériaux-Nanostructures (CRPMN) porte principalement sur le développement de nouvelles générations de sources plasmas micro-onde et des techniques de caractérisation associées pour des études fondamentales sur la production d'espèces, sur l'interaction d'espèces avec la surface et sur l'élaboration de micro-nanostructures. Cette activité est menée sur des équipements propres développés au LPSC à travers des projets de recherche fondamentale et appliquée. Elle concrétise l'ouverture du CRPMN à l'international et son partenariat très fort avec le milieu industriel. Sous l'impulsion du CRPMN, la physique des plasmas constitue à l'Université de Grenoble une discipline à part entière enseignée dans de nombreuses filières de formations initiales et continues. Les deux principaux axes de recherche couvrent le domaine des technologies en couches minces qui émergent comme procédés spécifiques issues des études fondamentales menées, d'une part, sur l'élaboration de micro-nanostructures par plasma, et, d'autre part, sur la production d'espèces et leur interaction avec la surface. Ces études sont réalisées sur les technologies plasma développées au sein du groupe. Le groupe est associé à un laboratoire international – le LITAP (Laboratoire International des Technologies et des Applications des Plasmas) – qui regroupe 2 laboratoires français (LPSC et LAPLACE), l'université et l'INRS de Montréal, ainsi qu'à l'Institut Carnot.

# Centre de recherche plasmas-matériaux-nanostructures

S. Béchu, A. Bès, A. Lacoste, H. Le Quoc, J. Pelletier, T. L. Phan, G. Regnard, A. Todoran

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

## Physique et ingénierie des plasmas micro-ondes

Ce volet couvre aussi bien la physique et l'ingénierie des réacteurs plasma, que les méthodes et techniques de diagnostic associées. En ce qui concerne les réacteurs plasma, il s'agit d'une technologie développée par le groupe depuis 2000 et elle repose sur la distribution de sources plasma élémentaires selon des réseaux 2D et 3D. L'activité de recherche est centrée sur l'évolution de ces sources élémentaires en vue de l'extension du domaine opératoire (pression, fréquence) et de l'optimisation de l'efficacité énergétique, du générateur de micro-ondes jusqu'à l'applicateur micro-onde utilisé pour la production du plasma. Plusieurs types de sources élémentaires ont été développés pour aboutir à une nouvelle génération capable d'opérer sur un domaine de 4 décades en pression grâce à une transition continue d'un couplage résonnant (efficace dans le domaine de très basse pression) à un couplage collisionnel (très efficace au-delà du torr). Le développement de cette dernière génération de sources plasma a fait l'objet d'un projet ANR Blanc (terminé en 2010) et de deux sujets de thèse CIFRE (2008-2010 et 2009-2011) pour l'optimisation de leur efficacité énergétique et leur industrialisation.

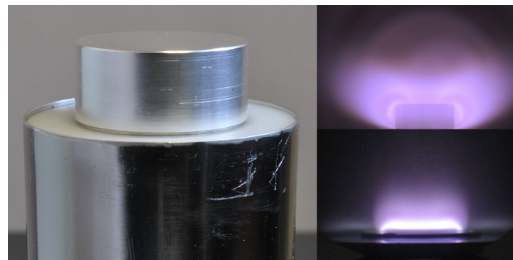


Fig. 1 : Plasma obtenu en sortie d'un applicateur micro-onde à 2,45 GHz.

Outre les fortes densités plasma (jusqu'à  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ), un avantage fondamental de ces technologies micro-onde réside dans la séparation des fonctions : production du plasma et paramètres d'interaction plasma-surface. Ceci est d'une importance déterminante, aussi bien au niveau des études fondamentales qui peuvent être effectuées de manière paramétrique, qu'au niveau de la flexibilité des conditions opératoires dans les applications nécessitant une maîtrise parfaite des paramètres de procédés (e.g. flux et énergie de bombardement), comme celles d'élaboration de matériaux.

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

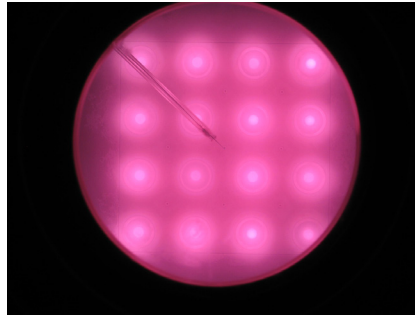


Fig. 2: Sources plasma élémentaires en configuration 2D dans un réacteur de dépôt de diamant polycristallin (réacteur monté au LSPM Villetaneuse).

Le groupe mène également une activité intense dans le développement des techniques de caractérisation de sources plasma développées, et, de manière plus générale, la caractérisation électrique des plasmas. Cette activité a conduit à la mise en place d'un banc de mesure de l'impédance plasma permettant d'en étudier le couplage onde-plasma, ou encore, d'un dispositif complet de mesure par sonde électrostatique permettant de déterminer les paramètres électriques et la fonction de distribution en énergie des électrons. Ce dernier dispositif est le fruit d'une collaboration étroite avec le service Électronique du LPSC et, ses performances et le programme associé pour le traitement de courbes développé par notre groupe, permettent d'envisager sa valorisation (cf. volet Valorisation). Le savoir faire du groupe dans le domaine des diagnostics se traduit également par de demandes d'expertise en la matière par des partenaires industriels ou de recherche (Adixen, CERN).

## Physique et ingénierie des matériaux en couches minces

La flexibilité que confèrent ces technologies plasma permet d'envisager et de mettre en œuvre des procédés d'élaboration des matériaux complexes de stœchiométrie et de micro-nanostructure contrôlées. C'est le cas, en particulier, des procédés pour applications tournées vers les micro-technologies (gravure, dépôt), mais aussi des matériaux fonctionnels pour le stockage et la conversion d'énergie.

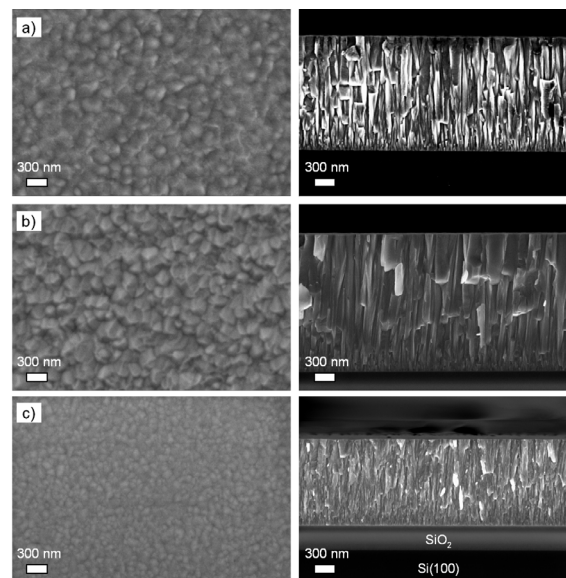


Fig. 3: Morphologie typique de surface (à gauche) et de section (à droite) des couches minces de solutions solides de composition contrôlée: a)  $Mg_2Si_{0,4}Sn_{0,6}$ ; b)  $Mg_2Si_{0,5}Sn_{0,5}$ ; c)  $Mg_2Si_{0,6}Sn_{0,4}$ , non dopées ou dopées Sb.

Les études fondamentales de gravure plasma concernent les effets du dopage (silicium) et de la température (silicium, polymères), les mécanismes physico-chimiques basés sur les effets stériques et de diffusion. Ces études visent, du point de vue fondamental, une meilleure compréhension des mécanismes réactionnels de surface et de leurs cinétiques (2 thèses en cours), et, du point de vue applicatif, la gravure anisotrope et sélective à facteur de forme élevé (projet ANR EMERGENCE-APANAGE 2010-2011).

De manière générale, les matériaux pour la conversion d'énergie (matériaux à forte capacité calorifique, alliages à mémoire de forme, matériaux thermoélectriques, matériaux magnétocaloriques...) sont des alliages binaires ou ternaires qu'il est important d'élaborer avec une composition très bien contrôlée. La pulvérisation (réactive ou non) assistée par plasma multi-dipolaire, qui permet de remplir cette spécification constitue un outil privilégié pour

l'élaboration de ces alliages en couches minces en vue de l'étude de leurs propriétés fondamentales. Ainsi, l'étude de différents matériaux ont fait l'objet de deux thèses sur les matériaux thermoélectriques à base de magnésium et une autre sur les composés à changement de phase ( $\text{VO}_2$  et  $\text{V}_2\text{O}_5$ ), cette dernière inscrite dans le cadre du LITAP.

D'autres matériaux nécessitant des conditions opératoires bien maîtrisées extrêmes ont été étudiés dans le cadre de différents contrats avec des partenaires académiques (Institut Néel, LSPM) et industriels, (Thales, Socrate Industrie, Metalor, Valéo), cf. volet Valorisation et Plateformes.

**Pour en savoir plus**

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

# Profileur médical

Y. Arnoud, I. Fonteille, M.-L. Gallin-Martel, O. Rossetto  
 B. Boyer, L. Gallin-Martel, Service Électronique  
 A. Pelissier, Service Détecteur et Instrumentation  
 Service Études et Réalisations Mécaniques  
 J.-Y. Giraud (Grenoble Institut Neuroscience, unité INSERM U836, équipe 6)

*The IMRT Arctherapy uses Multi-Leaf Collimator (MLC) for beam intensity modulation. It allows a dose increase in the tumor with a homogeneous dose deposit and leads to a reduction of the dose in the nearby normal organs. The leaf position is controlled by a mechanical device that may introduce possible failure. There is a need to check the position of the leaf during treatment. The treatment must be stopped if a deviation of 2 mm from the nominal position is detected. Since 2009 the LPSC, thanks to its expertise in MicroMegas amplification techniques, is involved for developing a new gaseous detector dedicated to online measurement of the beam properties upstream the patient.*

## Principe du profileur médical

La mise en œuvre de nouvelles techniques d'irradiation en radiothérapie, comme le masquage dynamique du faisceau (IMRT) permet un dépôt de dose plus précis au niveau des tissus à traiter. Ces techniques pointues nécessitent la mise en place de nouveaux systèmes de contrôle, qui ne sont pas actuellement présents sur les machines commerciales. Face à la complexité croissante des traitements, et aux accidents de sur-irradiations passés, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire a imposé la mise en place de nouveaux contrôles de dosimétrie in vivo.

L'acte de radiothérapie doit être extrêmement précis. Il vise à délivrer de la manière la plus précise possible une dose prescrite de rayonnements ionisants au volume tumoral, en épargnant les tissus sains avoisinants. En pratique tout surdosage supérieur à 5% est susceptible d'entraîner des complications cliniques sévères et tout sous-dosage au-delà de 5% peut rendre le traitement inefficace. Dans ce contexte, nous proposons le développement d'un détecteur pour la mesure en temps réel de la forme du faisceau d'irradiation de photons en sortie d'accélérateur. Il validera la conformité de l'irradiation au plan de traitement initialement prévu, aussi bien par l'aspect de la forme du faisceau en sortie du collimateur multi lames que par la mesure de la dose associée.

Ce projet a reçu l'aval du conseil scientifique du laboratoire au printemps 2009. Un dépôt de brevet a été effectué en 2011. En effet à ce jour, seulement deux systèmes sont commercialisés : la chambre de David de la société PTW et le détecteur Compass de la société IBA. Bien que présents sur le marché, ils sont encore très peu utilisés en pratique clinique. La chambre de David est apparue sur le marché en 2007 c'est une chambre à fil monodimensionnelle alors que le détecteur que nous visons devrait permettre une mesure bidimensionnelle sur une large surface de l'ordre de 30x30 cm<sup>2</sup>. Le détecteur Compass est apparu en 2008, c'est une matrice de 40x40 chambres d'ionisation, la principale critique qu'on peut lui faire concerne l'atténuation qui n'est pas uniforme mais varie de 3,5% à 5%

Le détecteur gazeux qu'on développe au LPSC sera glissé dans des supports standard existants sur les têtes d'accélérateurs, il permettra la mesure en ligne du faisceau en amont du patient. Il devra répondre à un cahier des charges exigeant notamment :

- transparence, de façon à limiter la production d'électrons de contamination,
- bonne tenue aux rayonnements,
- poids faible pour ne pas perturber le mouvement de rotation du bras de l'accélérateur,
- résolution spatiale de 3 mm sur le positionnement des lames,
- présenter un coût acceptable.

Pour mener à bien ce projet nous nous inscrivons dans le cadre du projet national ISI INSPIRA<sup>1</sup>, financé par OSEO (4 millions d'euros, dont ~180 k€ pour le LPSC), cela représente un consortium de 3 industriels et 10 partenaires scientifiques et cliniques. L'étude du profileur est faite à l'aide de simulations Geant4, les tests des prototypes se font au CHU de Grenoble.

## Résultats et performances des modules prototypes

Le profileur de faisceau sert donc à mesurer les caractéristiques 2D du faisceau (forme et intensité) en sortie d'accélérateur et en amont du patient, afin d'assurer le suivi de la qualité de l'irradiation en temps réel. Une première série de mesures a démarré en 2009 avec l'ancien profileur de faisceau de l'expérience Graal du LPSC, afin d'estimer la fluence des photons en sortie d'accélérateur.

Deux prototypes dédiés ont ensuite été développés au LPSC. Des mesures régulières sous les faisceaux des accélérateurs médicaux du service de radiothérapie du CHU de Grenoble ont dès à présent permis de mesurer localement la forme

<sup>1</sup> INformatique pour la Sûreté des Procédés et Installations en RAdiothérapie

du faisceau, et l'évolution temporelle de ses caractéristiques. Le premier de ces prototypes comporte 200 chambres d'ionisations individuelles, juxtaposées. La réponse de ce détecteur sous faisceau de radiothérapie a permis de valider les résultats de la simulation Monte-Carlo et d'établir le cahier des charges de l'électronique d'acquisition.

Le second prototype utilise un design innovant et dispose de 6400 chambres d'ionisation, cloisonnées pour réduire la diaphonie. L'électronique analogique nécessaire à la lecture des signaux a été développée par le service électronique, alors que le service détecteurs et instrumentation a assuré l'intégration des éléments issus de la phase de R&D.

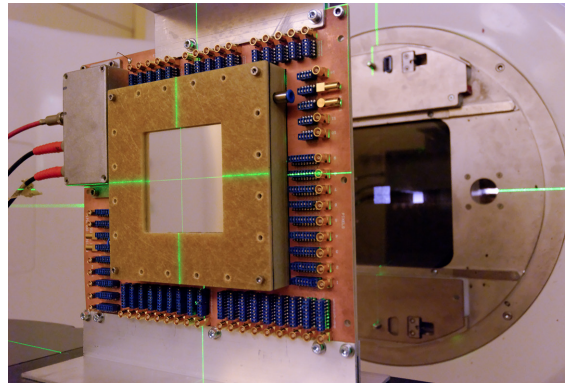


Fig. 1: Test au CHU de Grenoble du premier prototype.

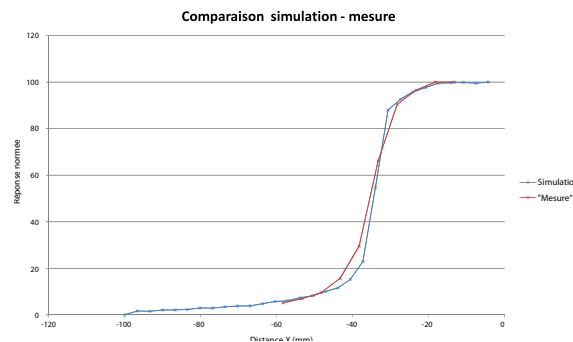


Fig. 2: Profil du faisceau: comparaison simulation Géant 4 et mesures, simulation sans espace de phase, seuls les photons émis par la tête sont considérés.

L'ensemble des études a conduit :

- au design innovant de la géométrie électrodes de lecture / cloisons d'isolement, qui a été réalisé selon nos plans par le groupe TS-DEM au CERN qui seul a la maîtrise de fabrication du procédé de dépôt / gravure des micro-piliers, réduisant le cross talk entre les voies,
- à la réalisation d'un deuxième prototype qui comporte une zone utile constituée d'une dizaine de milliers de chambres d'ionisation indépendantes, avec un adressage matriciel des électrodes de lecture

Ce détecteur atténue le faisceau à moins de 1% (mieux que la concurrence) et il a été ajusté pour une perturbation du faisceau d'irradiation minimale. Son atténuation, très faible, est homogène sur toute sa surface. Cette seconde version comporte 6400 voies de lecture, réparties en 3 étages. La surface traversée par le faisceau est équipée de voies de lecture, ne présente aucune zone morte grâce à sa géométrie en plans superposés montés en damiers dont les zones actives sont montées en quinconce soutenues par les piliers du CERN.

Ce concept de détecteur a donné lieu à un dépôt de brevet [FR n°11/53254]. Ce prototype est en test depuis juin 2011.

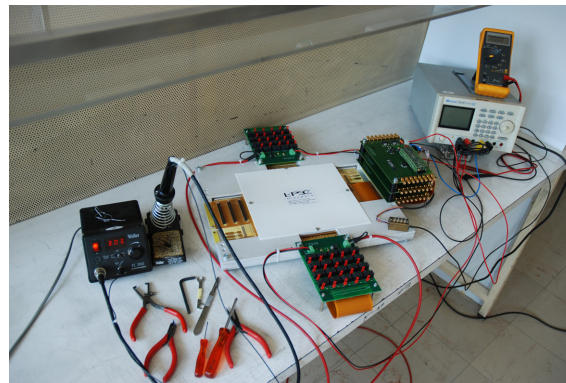


Fig. 3: Deuxième prototype à 6400 voies et à lecture matricielle.

Un troisième prototype va être réalisé, permettant une mesure 2D et en temps réel des faisceaux au cours de l'irradiation. Après réduction des données, les signaux de ce détecteur seront transmis en ligne à une console de décision, afin d'arrêter l'irradiation dans le cas où une anomalie serait mise en évidence, par rapport au plan de traitement initialement établi.

### Réalisations techniques

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

Développement d'un premier prototype comportant plusieurs géométries.

Les expérimentations sous les faisceaux des accélérateurs du CHU de Grenoble ont permis de retenir la géométrie optimale.

Développement d'un deuxième prototype.

- ajout de cloisons entre cellules pour améliorer la résolution et éviter la diaphonie entre les voies de lecture,
- conception d'une électronique multivoies de lecture des données mettant en œuvre un préamplificateur de charge conçu au laboratoire par le service d'électronique,
- adaptation de cette électronique à l'environnement bruyant du klystron (Fig. 4),
- assemblage du détecteur à trois étages, 3 PCB double face de 100 µm.

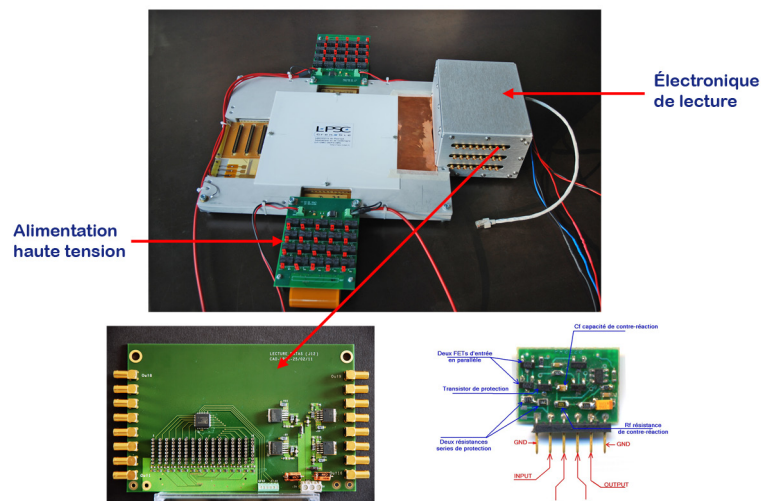


Fig. 4. : Détail de réalisation en électronique pour le second prototype : cartes d'électronique développées au LPSC pour recevoir les préamplificateurs à bas bruit, conçus pour la lecture des signaux analogiques.

D'autres développements sont envisagés dans un futur proche, il s'agit du développement d'un système d'acquisition temps réel (ASIC) par le service d'électronique.

