

## Recherche interdisciplinaire

Au LPSC, la recherche interdisciplinaire 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, jusqu'à 25 MeV, pour irradier en profondeur les tissus cancéreux. Dans ce domaine en constante évolution, la radiothérapie conformationnelle 3D permet d'ajuster 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 pixélisé en 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 et limiter la production d'électrons de contamination), 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 issus 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.

# Profileur médical

Y. Arnoud, M.-L. Gallin-Martel, O. Rossetto, R. Delorme  
B. Boyer, L. Gallin-Martel, Service Électronique  
O. Guillaudin, A. Pelissier, Service Détecteur et Instrumentation  
Service Études et Réalisations Mécaniques  
J.-Y. Giraud, R. Sihannath, N. Docquière (Service de Radiothérapie de Grenoble Michalon,  
Grenoble Institut Neurosciences, unité INSERM U836, équipe 6)

*New technics in external photonic radiotherapy involve the use of a MultiLeaf Collimator for beam intensity modulation. It allows a dose increase in the tumour 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 and the stability of the linac accelerator during the delivery session. Any sizeable deviation from the planned treatment will be tracked and the forthcoming sessions will be adapted in accordance. Since 2009, the LPSC is involved in developing a new gaseous detector dedicated to online measurement of the beam properties upstream to the patient, in collaboration with the radiotherapy center of the Grenoble Public Hospital.*

## Principe du profileur médical

La mise en œuvre de nouvelles techniques d'irradiation externe 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 Sûreté Nucléaire a imposé la mise en place de nouveaux contrôles de dosimétrie in vivo. Dans ce contexte, nous développons un détecteur pour la mesure en temps réel de la fluence du faisceau d'irradiation de photons en sortie d'accélérateur, en amont du patient. Il validera la conformité de l'irradiation au plan de traitement initialement prévu, aussi bien par l'aspect du suivi dynamique de la position des lames du collimateur multi lames nécessaire à la modulation du faisceau, que par la mesure de l'intensité de celui-ci.

Ce développement répond à une demande formulée par la communauté des physiciens médicaux, suite à la mise en œuvre de la dosimétrie in vivo imposée par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. Ce projet a reçu l'aval du conseil scientifique du laboratoire au printemps 2009.

Le cahier des charges du détecteur développé au LPSC regroupe :

- Une couverture intégrale 2D allant jusqu'à 40 x 40 cm du champ d'irradiation.
- Une atténuation minimale et homogène du faisceau, permettant aussi de limiter la production d'électrons de contamination.
- Une mesure en temps réel de chaque impulsion de faisceau délivré par l'accélérateur.
- Une résolution spatiale sur la position des lames de l'ordre du millimètre.
- Une bonne tenue dans le temps à l'irradiation.
- Un faible poids.

Ce projet trouve diverses sources de financement: la région Rhône-Alpes, l'INSERM par le biais du plan PhysiCancer et le projet national ISI INSPIRA<sup>1</sup> qui comporte 3 industriels et 10 partenaires scientifiques et cliniques. Il est aussi intégré au LABEX PRIMES<sup>2</sup>. L'étude du profileur est faite à l'aide de simulations Geant4 et PENELOPE, les tests des prototypes se font au CHU de Grenoble et à l'ESRF. Deux dépôts de brevet ont été effectués en 2011 et 2013.

### 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. Depuis les premières mesures en 2009, trois prototypes ont été développés au LPSC, les deux derniers mettant en œuvre des technologies innovantes, donnant lieu à deux dépôts de brevet.

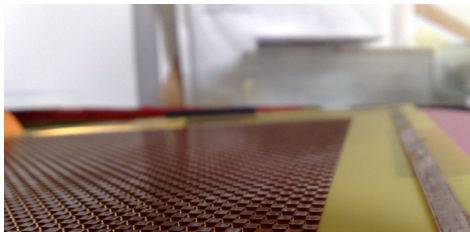


Fig. 1: Détail de la structure cloisonnée du 2e prototype pour limiter la diaphonie. Les piliers d'isolement de 500 µm de hauteur ont été réalisés en polyimide, selon une technique innovante.

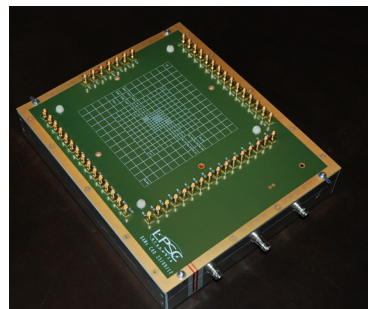


Fig. 2: Le troisième prototype met en œuvre des électrodes de taille croissante afin de conserver une excellente transparence tout en assurant une couverture complète de la zone instrumentée.

Des mesures régulières sous les faisceaux des accélérateurs médicaux du service de radiothérapie du CHU de Grenoble et plus récemment à l'ESRF<sup>3</sup> permettent de progresser dans le design des électrodes de collecte de charge et en parallèle de valider l'électronique de proximité développée au LPSC, et qui est nécessaire à l'amplification des signaux.

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 la diaphonie entre les voies.
- Au design innovant d'électrodes couvrant une plus grande surface en zone périphérique sans engendrer plus de signal, ceci permettant l'utilisation d'un système d'acquisition à gain constant, indépendamment de la taille des électrodes de collecte des charges.

Ces développements ont donné lieu à deux dépôts de brevet.

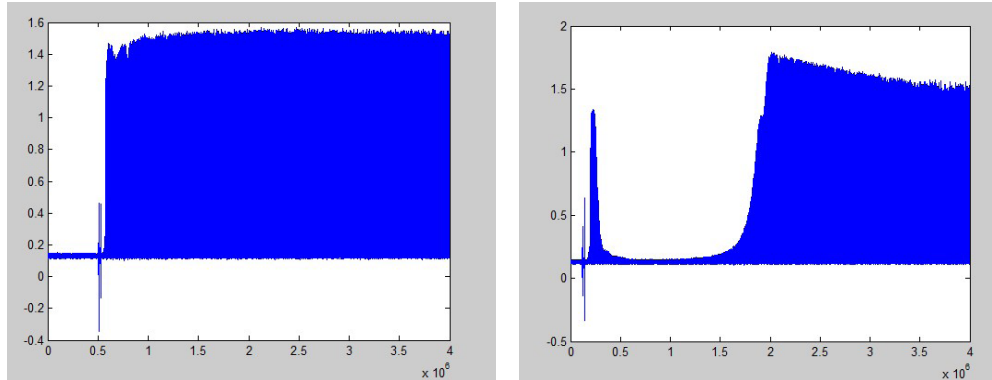
Un nouveau prototype comportant une refonte des technologies validées sous faisceau est en cours de réalisation. Il intègre l'électronique miniaturisée développée au LPSC en 2013 et permettra une acquisition précise à l'échelle de l'impulsion de faisceau délivrée par l'accélérateur de radiothérapie.

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

<sup>2</sup> Physique, Radiobiologie, Imagerie Médicale et Simulation

<sup>3</sup> European Synchrotron Radiation Facility

Le détecteur et son électronique de contrôle et d'acquisition intégrée sera ultérieurement interfacé avec les systèmes experts de contrôle qualité en radiothérapie, pour permettre une mesure en ligne des caractéristiques dynamiques du faisceau d'irradiation.



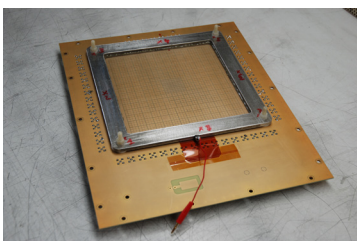
*Fig. 3: Mesure temporelle de l'amplitude du signal recueilli sur une des électrodes du 3ème détecteur, placé sous faisceau d'irradiation. Si on observe à gauche une montée en puissance rapide avant stabilisation de l'intensité du faisceau, l'enregistrement de droite montre au contraire un démarrage chaotique (baisse d'intensité, arrêt de l'irradiation puis reprise avec décroissance lente de l'amplitude pour retrouver un régime stable), pour un retour à une irradiation régulée au bout de 3 secondes.*

### Réalisations techniques

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

En particulier, la nécessité d'une étude approfondie des signaux analogiques a conduit à la réalisation par le SE d'un module comportant 16 préamplificateurs de charge, avec mise en forme des signaux, codage numérique et lecture intégrée. L'accent a été mis sur la réjection des importants parasites générés par le klystron/magnétron utilisé dans l'accélérateur linéaire, au regard des très faibles courants des signaux en sortie d'électrodes.

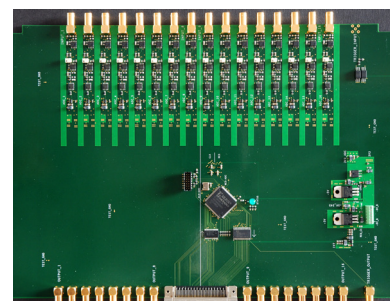
Ce module a parfaitement rempli son rôle et a permis le suivi en ligne des charges en sortie d'électrodes. Ceci a conduit à la validation de la géométrie des chambres d'ionisation utilisées dans le 3e prototype.



*Fig. 5: Détail de l'assemblage du détecteur de 3e génération.*

Le montage des éléments constitutifs du détecteur a été assuré par le SDI.

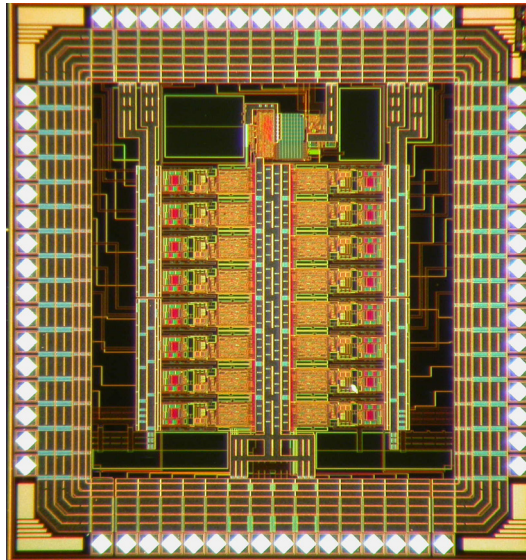
Enfin, un circuit ASIC dédié a été conçu par le SE, afin d'embarquer sur le circuit imprimé tout le système d'acquisition (collecte, amplification, codage numérique, mise en forme et transmission des données). Ce circuit a été testé intensivement et permet un suivi très précis des charges générées par le faisceau de radio-



*Fig. 4: Carte d'électronique d'amplification et de numérisation des charges développée pour le suivi en ligne des signaux à la sortie des électrodes du 3e prototype.*

thérapie. Par ailleurs, des tests sous faisceau synchrotron à l'ESRF ont permis de valider le très bon comportement du détecteur et de son électronique intégrée sous forte intensité. Il apparaît donc que l'ensemble du système sera à même de traiter les futurs faisceaux de radiothérapie en mode haute intensité FFF<sup>4</sup>, où la fluence effective du faisceau sera multipliée jusqu'à un facteur 6.

Dans les mois à venir, un détecteur intégré couvrant le quart de la surface cible, puis un dernier prototype couvrant l'intégralité du champ 40 x 40 cm<sup>2</sup> seront développés. Des contacts avec des partenaires industriels ont été initiés en vue de la mise sur le marché du détecteur, qui assurera le suivi en ligne des faisceaux modulés en radiothérapie externe.



*Fig. 6: ASIC développé par le service électronique. Il permet la collecte des charges au plus proche des électrodes, avec une linéarité de codage de charge sur 16 bits meilleure que 0,4%.*

<sup>4</sup> Flatening Filter Free

# Plasmas-Matériaux-Nanostructures

A. Lacoste, S. Béchu, A. Bès, P. Baële, L. Bonny, H. Le Quoc, J. Pelletier, T. L. Phan, C. Prahoveanu, A. Todoran.

S. Roni, S. Roudier, Service des Études et Réalisations Mécaniques

G. Marcotte, D. Tourres, Service Électronique

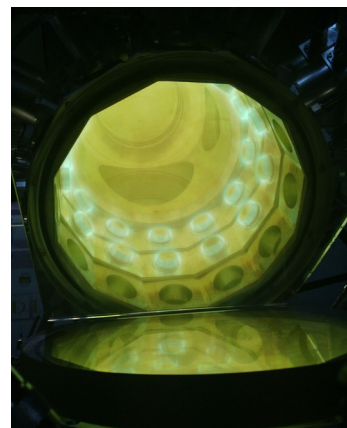
*The main research axes of CRPMN<sup>1</sup> are the development of innovative plasma technologies issued from fundamental research and their applications in different fields such as surface treatments, elaboration of new materials for energy conversion, production mechanisms of negative deuterium ions 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 modeling 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 favorably applied to surface processing and other applications where enhanced specifications must be met.*

## Plasmas micro-ondes et applications aux procédés

Les activités de recherche du groupe se déclinent en deux principaux axes : 1) conception et étude des sources plasma excitées par micro-ondes ; 2) Applications des plasmas aux procédés en volume ou en surface. Ces activités sont menées en collaboration avec des partenaires académiques et industriels dans le cadre de différentes structures auxquelles le groupe est associé : LIA-LITAP (Laboratoire International sur les Technologies et Applications des plasmas), Institut CARNOT Énergies du Futur, Fédération FR-FCM (Fusion et Confinement Magnétique), Réseau CNRS Plasmas Froids.

### Physique et ingénierie des plasmas micro-onde

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 utilisé pour la transmission et 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 des très basses pressions) à un couplage collisionnel



*Fig. 1: Sources plasma élémentaires en configuration 3D dans un réacteur de procédé. Plasma d'iode à 0,5 mTorr et 50 W par source élémentaire.*

<sup>1</sup> Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures

(très efficace au-delà du torr). Le perfectionnement et l'évolution de ces sources pour des applications spécifiques font l'objet des projets successifs comme ANR Emergence-APANAGE (terminé en 2013), FUI-GMP DLC2 (démarré en 2013) ou des projets collaboratifs avec financement des thèses CIFRE (deux thèses en cours).

La spécificité des sources plasma étudiées et développées au sein du groupe 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.

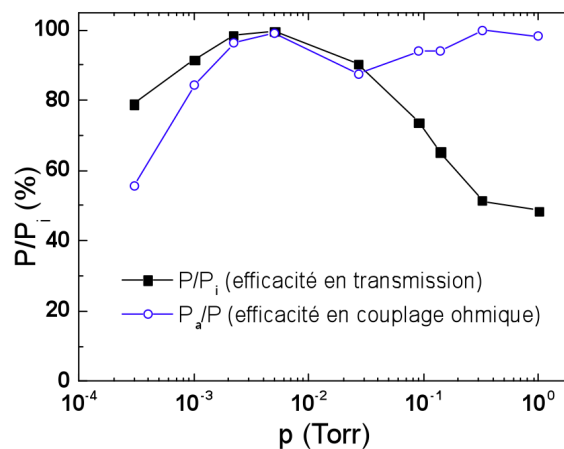


Fig. 2: Rendement de transmission et de couplage d'une source plasma élémentaire en fonction de la pression d'argon.

Au niveau plus fondamental, ces technologies micro-onde et les diagnostics 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 ce, de manière découplée entre volume et surface. Compte tenu de très nombreuses applications des plasmas hydrogénés, plusieurs études portent sur les plasmas d'hydrogène pour la production efficace d'espèces atomiques neutres ou négativement chargées. Ces études sont menées dans le cadre de différents projets comme ANR Blanc ITER-NIS (terminée en 2012), FR-FCM-EURATOM (2012, 2013), ou encore dans le cadre d'une collaboration dans un projet ANR JCJC Maria's Storhy (2012-2014).

### 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 les applications tournées vers les micro-technologies (gravure, dépôt), mais aussi des matériaux fonctionnels pour le stockage et la conversion d'énergie.

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), et, du point de vue applicatif, la gravure anisotrope et sélective à facteur de forme élevé (projet ANR-APANAGE 2010-2012).

De manière générale, les matériaux fonctionnels 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 répondre à 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 est effectuée dans le cadre des projets financés et porte entre autres sur : (i) les matériaux thermoélectriques à base de magnésium (thèse/projet CNRS-Valeo); (ii) les hydrures complexes à base de magnésium (post-doc/projet ANR-JCJC et thèse/projet CARNOT-Athos); (iii) les composés à changement de phase (projet dans le cadre du LIA-LITAP); (iv) les contacts électriques sur diamant monocristallin (ANR blanc-MONODIAM).

***Pour en savoir plus***

<http://lpsc.in2p3.fr/index.php/activites-scientifiques/le-crpmn>.