

Physique pour l'Énergie et la Santé

Cette thématique regroupe les activités de deux groupes du laboratoire : le groupe de Physique des Réacteurs, et celui de Physique pour les Applications Médicales, et englobe plusieurs projets dont le caractère transdisciplinaire fédère des chercheurs et personnels techniques de plusieurs autres entités au sein du LPSC.

Les principaux objectifs scientifiques du groupe de physique des réacteurs sont l'étude de systèmes innovants pour la production d'énergie nucléaire, l'utilisation du cycle thorium en réacteur ainsi que l'amélioration de la gestion des déchets des filières actuelles et leur possible incinération dans des systèmes dédiés. Il est organisé en trois équipes : ExpR (Expériences pour les Réacteurs), MSFR (Molten Salt Fast Reactor) et MAP (Modélisation, Analyse, Prospective).

La première équipe développe trois axes : la mesure de rendements de fission et de rapports isomériques auprès du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL, avec un focus particulier dans la région des fragments lourds et symétriques et le développement de méthodes innovantes de propagation des incertitudes et d'évaluation de leurs corrélations. Le second axe concerne la physique des réacteurs expérimentale à travers l'avancement du projet FREYA, dédié à l'étude du contrôle en ligne de la réactivité d'un ADS. Les expériences liées à ce projet ont lieu auprès de l'installation GUINEVERE du SCK-CEN, située à Mol en Belgique. Le troisième concerne la problématique des sels fondus en circulation forcée et les aspects physico-chimiques et thermo-hydrauliques associés (FFFER et SWATH).

Le groupe poursuit par ailleurs l'étude du concept MSFR, qui est un réacteur à sels fondus en spectre neutronique rapide. Développé initialement au LPSC, il est maintenant étudié internationalement dans le cadre du projet européen SAMOFAR et au sein du Forum Génération IV. Ce réacteur, caractérisé par son combustible liquide circulant, nécessite le développement de méthodologies et d'outils innovants pour réaliser les études et les optimisations de sûreté et de conception au cœur des activités actuelles de l'équipe.

L'équipe MAP du groupe de physique des réacteurs a structuré ses activités autour de trois axes principaux : le développement d'outils académiques simples de cinétique spatiale et de thermo-hydraulique, la mise au point de modèles multi-physiques best estimate pour les futurs réacteurs et les études de scénarios technico-économiques.

La thématique de la physique pour les applications médicales s'est consolidée au sein du laboratoire au cours de la période 2014-2015, ce qui a progressivement conduit à la structuration du groupe éponyme. Historiquement cette thématique était centrée sur le groupe DAME (Développements et Applications pour le Médical) et le projet TraDeRa, initié en collaboration avec le CHU-Grenoble, dont l'objectif est la mise au point d'un détecteur transparent pour le monitoring du faisceau de radiothérapie conformationnelle avec modulation en intensité (RCMI). L'activité s'est élargie avec l'émergence d'un projet local sur la radiothérapie par capture nucléaire de neutrons thermiques produits par accélérateurs (AB-NCT, Accelerator-Based-Neutron Capture Therapy), le démarrage d'une R et D sur la contribution au contrôle du traitement par hadronthérapie à l'aide de détecteurs diamants de grande surface, et des études sur l'effet radiosensibilisant des nanoparticules métalliques.

Toutes ces activités ont en commun de s'inscrire dans un contexte collaboratif local, avec des partenaires cliniques tels que le CHU, en s'appuyant sur les infrastructures expérimentales telles que l'ESRF ou l'ILL. À l'échelle régionale, elles s'inscrivent dans le cadre du LabEx PRIMES, fortement axé sur les développements autour des radiothérapies innovantes. Nationalement, nos activités sont soutenues par le GDR MI2B, et, pour les recherches liées à l'hadronthérapie, par l'infrastructure nationale France Hadron.

Nos projets cherchent à améliorer l'efficacité thérapeutique des traitements de radiothérapies innovantes, en optimisant la dose déposée dans la tumeur tout en épargnant au mieux les tissus sains, et de vérifier la qualité de leur délivrance. La réponse que nous tentons d'apporter est orientée vers une optimisation du ciblage, soit balistique (localiser le dépôt de dose en hadronthérapie et contrôler le flux de photons en RCMI), soit par une radiosensibilisation au moyen de molécules vectorisées en NCT, ou de nanoparticules, augmentant le dépôt de dose localement.

Données Nucléaires

A. Chebboubi, S. Julien-Laferrrière, G. Kessedjian, O. Méplan, C. Sage

Service Électronique, Service Informatique, Service Détecteurs et Instrumentation, Pôle Accélérateurs, Service Études et Réalisations Mécaniques

The study of fission yields has a major impact on the characterization and understanding of the fission process and is mandatory for reactor applications. The mass and isotopic yields of the fission fragments have a direct influence on the amount of neutron poisons that limit the breeder character of the new system and on the evaluation of the nuclide inventory and the residual power of the reactor after shutdown. The LPSC in collaboration with ILL and CEA has developed a measurement program on fission fragment distributions at the Lohengrin spectrometer of the ILL, with a special focus on the heavy and symmetry region. Innovative methods have been developed concerning the uncertainties propagation and the estimation of their correlations. Furthermore, new measurement technics of the isomeric ratios induced by fission have been investigated, in order to provide crucial data for the understanding of the fission process. Moreover, a specific study on Gas Filled Magnet (GFM) spectrometers devoted to the fission fragment has been achieved in the framework of the FIPPS project.

Problématique des rendements de fission

Le groupe a poursuivi son programme de mesures de rendements de fission d'actinides d'intérêt pour les cycles du combustible actuels et innovants sur le spectromètre Lohengrin en collaboration avec l'ILL et le CEA (Cadarache et Saclay). De telles données sont en effet cruciales pour l'évaluation de plusieurs observables telles que l'inventaire de fin de cycle (composition isotopique), la puissance résiduelle ou encore la radiotoxicité du combustible usé. Par ailleurs, elles revêtent également une importance plus fondamentale concernant l'étude du processus de fission. Ces nouvelles mesures amplifient les contraintes sur les modèles de fission afin de tester le pouvoir de prédiction de ces derniers. En outre, la mesure expérimentale des rapports isomériques donne une information indirecte sur la distribution de spin et l'énergie d'excitation disponible lors de la scission, observable clé dans l'évaluation des données nucléaires.

Mesures de rendements en masse et en charge

Les travaux effectués concernent notamment les mesures de rendements en masse et en charge de fission induite par neutrons thermiques de ^{235}U et de $^{239,241}\text{Pu}$, avec un focus particulier dans la région des fragments lourds et symétriques. Cette dernière est souvent peu fournie en données expérimentales. Nous avons donc mis au point un protocole complet de mesure et d'analyse, qui inclut notamment l'évaluation des corrections systématiques et des biais de l'instrument, ainsi que des matrices de variance-covariance expérimentales. Notre méthode d'analyse fournit en outre des rendements auto-normalisés, indépendants de toutes mesures ou évaluations extérieures.

La région des fragments de masse symétrique constitue un défi intéressant à relever. Du fait des très faibles rendements, cette région possède une grande influence sur les hypothèses des modèles, en particulier l'existence des modes de fission. Pour la première fois, nous avons mis en évidence de manière directe l'existence de ces modes pour la fission thermique en accord avec les calculs microscopiques de ces dernières années ou le modèle phénoménologique de Brosa.

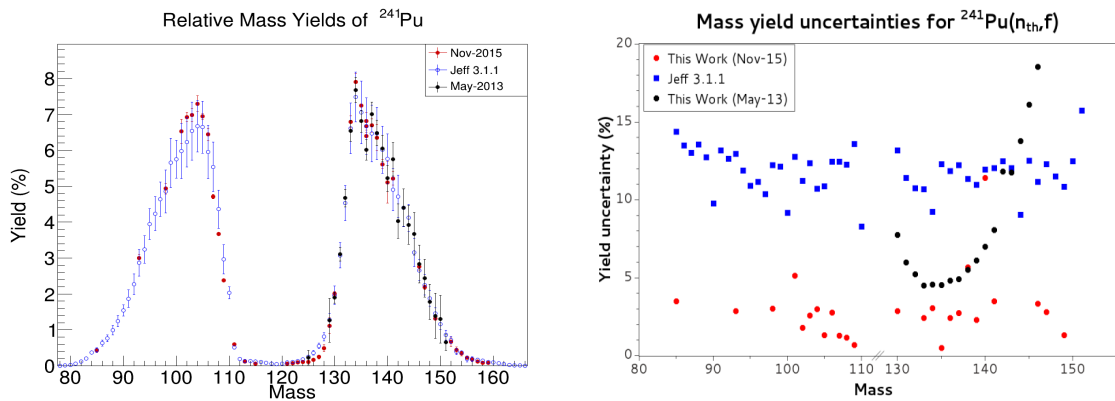


Fig. 1 : Mesures des rendements en masse de la réaction $^{241}\text{Pu}(n_{\text{thr}},f)$ et incertitudes associées.

Mesures de rapports isomériques des produits de fission (PF)

Notre travail de mesures de rapports isomériques (RI) a pour premier objectif la construction d'une nouvelle bibliothèque de mesures de RI permettant de déduire les distributions de spin des PF. L'objectif est de pérenniser les RI avec leur matrice de sensibilités en conservant les résultats expérimentaux libres de tous modèles et données de structures nucléaires. La mise à jour des distributions de spin sera garantie par la complétude des informations fournies par la bibliothèque.

Le deuxième objectif a pour ambition de réaliser un test global sur le plus grand nombre d'isotopes afin d'identifier les modèles « non-rejetés » et leur plage de validité. Nos différentes techniques expérimentales nous permettent en effet d'avoir accès à une large échelle de temps de décroissance : isomères métastables, microsecondes et nanosecondes. La figure 2 montre l'évolution du RI en fonction de l'énergie cinétique pour le ^{132}Sn , ce qui constitue un résultat inédit et ouvre des perspectives intéressantes pour confronter cela avec des codes de désexcitation nucléaire tel que le code FIFRELIN développé au CEA Cadarache.

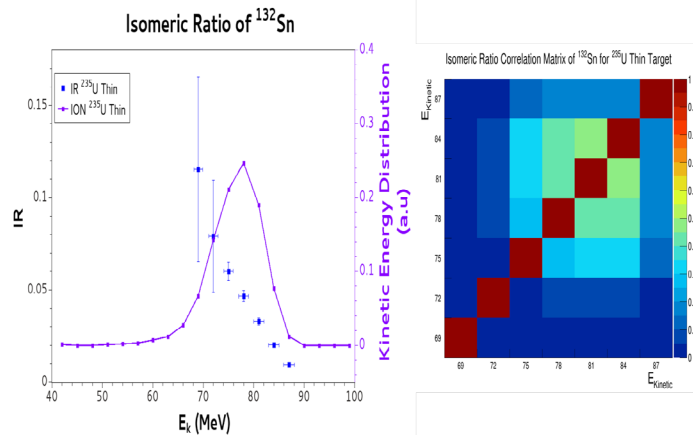


Fig. 2 : Évolution du rapport isomérique en fonction de l'énergie cinétique sélectionnée par Lohengrin pour le ^{132}Sn .

Étude expérimentale et modélisation des GFM comme filtre de fragments de fission

Le groupe est impliqué dans l'étude de faisabilité du projet FIPPS (Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer) de l'ILL, qui a pour but la réalisation d'un nouveau spectromètre pour étudier les propriétés des particules promptes (n ou γ). Ce projet correspond au couplage d'un ensemble de détecteurs Ge avec un « filtre fission », rôle potentiellement joué par un aimant magnétique gazeux. Les propriétés d'un tel aimant furent donc étudiées, tant expérimentalement par la réalisation d'expériences dédiées à l'ILL, que théoriquement par le développement d'un programme de simulation des trajectoires des produits

de fission dans un tel aimant. Ainsi nous avons pu mesurer le pouvoir de séparation des spectromètres magnétiques gazeux, leur résolution en masse et en charge ainsi que la dépendance de l'énergie initiale sur le champ optimal. Ces résultats débouchent à présent sur l'étude du dimensionnement et des performances d'un aimant spécifique pour le projet FIPPS, en collaboration avec l'ILL et le Pôle Accélérateurs du LPSC.

Pour en savoir plus

- » *²³³U mass yield measurements around and within the symmetry region with the ILL Lohengrin spectrometer, A. Chebboubi et al., EPJ Web of Conferences 111, WONDER-2015 – 4th International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor applications*
- » *Isomeric ratio measurements with the ILL Lohengrin spectrometer, A. Chebboubi et al., EPJ Web of Conferences 111, WONDER-2015 – 4th International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor applications*
- » *Development of a Gas Filled Magnet spectrometer within the FIPPS project, A. Chebboubi et al., EMIS-2015 Proceedings, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics*

Physique des réacteurs expérimentale : avancement du projet FREYA

A. Billebaud, S. Chabod

Service Électronique, Service Informatique, Service Détecteurs et Instrumentation, Pôle Accélérateurs, Service Études et Réalisations Mécaniques

The FREYA (FP7) project addresses the main issue of the on-line monitoring of an ADS reactivity. It aims at validating a methodology that consists in the combination of two approaches: (i) the time monitoring of the reactor power as well as of the source intensity, that give access to the on-line relative fluctuations of the reactivity, $\rho(t)$; (ii) some calibration measurements, performed regularly, providing an absolute level of ρ . The calibration measurements are based on the analysis of the time decay of the reactor neutron population measured during programmed beam interruptions. At LPSC, we are developing and testing an innovative analysis method that focuses on the prompt component of the neutron population decay and can provide the prompt multiplication factor of the reactor. This method was applied to the experimental data taken at the GUINEVERE facility (SCK-CEN), and has given results in good agreement with reference reactivity values. In parallel a work was also undertaken to analyse the neutron source monitors spectra in order to extract the intensity of the neutron source.

Expériences FREYA

Pour vérifier qu'un ADS reste sous-critique en fonctionnement, une condition imposée pour des raisons de sûreté, il faut pouvoir combiner deux approches : (i) effectuer une mesure en ligne de l'intensité de la source externe de neutrons et du flux de neutrons dans la réacteur, qui donnent l'évolution relative de la réactivité ρ du réacteur au cours du temps ; (ii) recalcr ces mesures relatives avec des mesures absolues de ρ , qui doivent être effectuées à intervalles réguliers. La difficulté principale de ce type de mesure réside dans la nécessité d'extraire un indicateur *global* du fonctionnement du réacteur, la réactivité ρ , en effectuant des mesures *locales* à l'aide de chambres à fission, des détecteurs de neutrons quasi ponctuels à l'échelle du réacteur. L'objet du projet FREYA (Fast Reactor Experiments for hYbrid Applications, FP7) débuté en 2011 est de mener des expériences sur une maquette à puissance nulle permettant de tester différentes façons de mesurer ce paramètre et d'en éprouver la robustesse.

L'installation GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VENus REactor) a été réalisée au SCK-CEN (Mol, Belgique) pour tester la méthodologie de mesure en ligne de la réactivité. Elle consiste en le couplage d'un réacteur maquette sous-critique (le réacteur VENUS-F) à une source de neutrons de 14 MeV générés par l'accélérateur de deutons GENEPI-3C construit par une collaboration IN2P3 (réactions T(d,n) à 220 keV). Ce couplage est réalisé à puissance quasi-nulle. Le réacteur VENUS-F est instrumenté à l'aide d'une dizaine de chambres à fission principalement à dépôt d'uranium 235 ; leur signaux sont acquis par le système GANDDALF, développé au LPSC. Les années 2012, 2013 ainsi que le premier semestre 2014 ont vu la réalisation de multiples expériences pour le projet FREYA (plus d'un millier de runs), offrant de nombreuses données à analyser. Cette phase a nécessité la présence régulière sur le terrain d'équipes de physique de l'IN2P3 (LPSC, LPC Caen et IPNO), ainsi que l'investissement constant du Pôle Accélérateurs du LPSC, qui assure la conduite et l'entretien de l'accélérateur sur site depuis la fin de son installation (2010). Afin de pouvoir poursuivre les expériences sur une configuration de cœur plus proche de celle envisagée pour le démonstrateur d'ADS MYRRHA (en particulier en termes de spectre), un nouveau cœur critique a été chargé mi-2014. La caractérisation de ce cœur, étape préalable aux expériences sous-critiques, s'est déroulée jusqu'à l'automne 2015. Le couplage avec l'accélérateur en vue des expériences sous-critiques a été effectif fin 2015. Au cours des années 2014 et 2015 le travail du CNRS s'est donc concentré sur l'analyse des données sous-critiques, et en particulier au LPSC sur l'analyse des mesures dynamiques par la méthode k_p et en parallèle une analyse plus générale des moniteurs de la source de neutron.

Analyse par la méthode k_p

La méthode k_p est une solution développée au LPSC pour extraire la valeur de la réactivité ρ d'un ADS en analysant la décroissance de sa population de neutrons consécutive à l'injection d'un pulse de neu-

trons source. Concrètement, l'obtention de ρ s'effectue en comparant les taux de comptage de chambres à fission positionnées dans le réacteur VENUS-F avec des prédictions théoriques obtenues en résolvant une équation faisant intervenir deux distributions : (i) la densité de probabilité $P(\tau)$ qu'un neutron créé dans le réacteur au temps t induise une fission au temps $t+\tau$; (ii) la distribution $D(\tau)$ des temps écoulés entre la création d'un neutron au temps t dans le réacteur et le moment, $t+\tau$, où il induit une fission dans le dépôt d'un détecteur. Ces distributions peuvent être calculées à l'aide du code Monte-Carlo MCNP. En 2014, la méthode k_p a été testée avec succès sur quatre variantes de la configuration SC1 du réacteur VENUS, obtenues en faisant varier la hauteur des barres de contrôles (CR) de 0 à 600 mm par pas de 250 mm environ. À chaque hauteur des CR correspond une valeur de la réactivité. Les résultats, présentés à la conférence PHYSOR en sept.-oct. 2014, sont en accord avec les valeurs de référence dans les barres d'erreur.

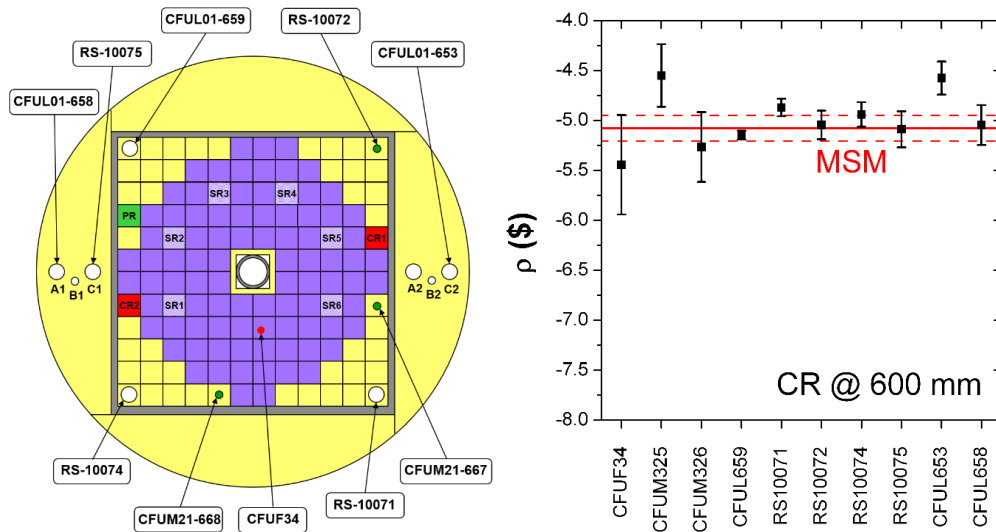


Fig. 1 : (Gauche) Coupe schématique dans le plan médian du réacteur VENUS-F en configuration SC1 ; (Droite) réactivités ρ en dollars obtenues avec la méthode k_p pour les dix détecteurs positionnés dans le réacteur, pour une hauteur des CR de 600 mm. Les résultats sont comparés à la valeur de référence, en rouge (référence MSM = trait plein, barres d'erreur MSM = traits en pointillés).

Les développements qui sont aujourd'hui menés sur la méthode k_p portent sur deux défis importants. Le premier défi est l'adaptation de la méthode k_p à l'analyse des données issues d'interruptions programmées de faisceau : ces interruptions, effectuées à une fréquence de quelques dizaines de Hz, formeront l'essentiel de la procédure de mesure absolue de la réactivité d'un ADS de puissance. Pour atteindre cet objectif, le cadre mathématique de la méthode, ainsi qu'une fraction importante de la procédure d'analyse, ont dû être remaniés. Les premiers tests de cette nouvelle approche ont été effectués sur les données prises dans la configuration SC1 de VENUS. Ils sont prometteurs mais sont pour l'instant limités par la faible statistique des données FREYA enregistrées dans ce mode. Le deuxième défi réside dans la quantification des barres d'erreur systématiques sur la réactivité dues aux incertitudes sur la modélisation du réacteur (géométrie, composition, données nucléaires de base). Cette tâche nécessite une automatisation complète de la procédure d'analyse, avec notamment un calcul automatique des courbes théoriques, de leur recalage temporel sur les données expérimentales, le calcul des estimateurs permettant la comparaison des données expérimentales et théoriques, et enfin la propagation des erreurs statistiques et systématiques des distributions $P(\tau)$ et $D(\tau)$ tout le long de la chaîne d'analyse, pour l'obtention de la barre d'erreur totale sur la réactivité. Les premiers résultats sont attendus début 2016.

Analyse des moniteurs de la source de neutrons

La connaissance de l'intensité de la source de neutrons injectée dans le réacteur sous-critique est primordiale pour l'application de la méthode de suivi en ligne de la réactivité du réacteur. Dans le cas de la maquette GUINEVERE cette grandeur est accessible via deux détecteurs silicium placés en amont de la cible tritiée. L'un permet de détecter les particules alpha et les protons issus respectivement des réactions $T(d,n)$ et $D(d,x)$ (dues à l'implantation des deutons dans la cible au fil du temps), appelé détecteur API, l'autre muni d'une feuille arrêtant les alphas ne monitoré que les protons et est appelé détecteur PI.

Ce dernier permet entre autres de monitorer la source de neutrons « parasite » due aux réactions sur le deutérium dont le spectre en énergie est différent de la source induite par des réactions T(d,n). Ces deux moniteurs, dont l'angle solide de détection est connu, permettent un monitoring absolu des deux sources de neutrons une fois prise en compte l'anisotropie des sources. Le travail d'analyse de ces moniteurs se fait donc en deux étapes : identifier la contribution de chacune des réactions en jeu, T(d,n)⁴He et D(d,p)T, puis établir le facteur correspondance avec l'intensité de la source absolue sur 4π (la source D(d,n)³He étant établie en fonction de D(d,p)T). Le travail s'est concentré sur la première étape en 2014 et 2015 afin de réaliser une identification claire des pics de détection des alphas et des protons. Les feuilles d'entrées de détecteurs PI et API étant différentes, les chaînes d'acquisition ayant subi plusieurs ajustements au cours du temps, des réactions parasites pouvant également produire d'autres particules chargées, l'interprétation des spectres n'est pas spontanée. Par ailleurs en raison de la différence d'intensité instantanée les spectres de monitoring acquis en faisceau continu et en faisceau pulsé ont des allures différentes, en particulier dans ce dernier cas la présence de pics de multiplicité supérieure à un complique l'exercice. Un travail de simulation a donc été entrepris afin de parvenir à une identification la plus précise possible des pics d'intérêt. La validation de l'identification sur des spectres clés est en cours. Elle permettra de traiter par la suite les spectres de monitoring de façon plus systématique.

Pour en savoir plus

- » *Reactivity measurements at GUINEVERE facility using the integral kp method, S. Chabod et al. Proceedings de la Conf. Intern. PHYSOR 2014 : "The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future", Kyoto (Japon) 28 septembre – 3 octobre 2014*
- » *Reactivity measurement of the lead fast subcritical VENUS-F reactor using beam interruption experiments, T. Chevret et al, Proceedings de la Conf. Intern. PHYSOR 2014 : "The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future", Kyoto (Japon) 28 septembre – 3 octobre 2014*
- » *Perdu et al., Prog. in Nucl. Energy 42 (2003)*

Étude du concept MSFR

M. Allibert, M. Aufiero, D. Gérardin, D. Heuer, A. Laureau, E. Merle-Lucotte

Molten salt reactors (MSRs) are a family of liquid-fueled fission reactor concepts using a fluid molten salt mixture as fuel. These liquid-fueled reactors exhibit unusual and interesting properties compared to solid-fueled reactors, requesting a revision of some well-known conception and safety rules. The Molten Salt Fast Reactor (MSFR) concept defined at LPSC is based on a fast spectrum and a liquid circulating fuel, and is recognized as a possible long-term alternative to solid-fueled fast reactors in the frame of the Generation IV international Forum. Conceptual design and safety activities are currently underway at LPSC so as to ascertain whether MSFR systems can satisfy the goals of Generation-IV reactors. These studies need dedicated tools and methodologies to take into account the specificities of the concept. The definition and assessment of MSFR operation and safety procedures thus requires the development and validation of dedicated multiphysics tools as the TFM-OpenFOAM approach described in this section. These activities take place in the frame of European projects, and national and international collaborations.

Le MSFR, réacteur à combustible liquide circulant, présente des caractéristiques spécifiques en terme notamment de sûreté et nécessite le développement de méthodologies et d'outils spécifiques pour son étude, objets des travaux réalisés ces deux dernières années au sein de l'équipe MSFR du groupe Physique des Réacteurs du LPSC. Au niveau national, ces travaux de recherche ont été soutenus par le défi NEEDS de la mission interdisciplinaire du CNRS, plus précisément dans le projet fédérateur « Systèmes Nucléaires », en collaboration avec AREVA, EDF et l'IRSN. Au niveau international, le MSFR est au cœur du projet européen SAMOFAR (Safety Assessment of the MOLten salt FAsT Reactor – 2015-2019) du programme Horizon2020 et des échanges et travaux du comité de pilotage MSR du Forum International Generation 4 (GIF).

Développement d'outils numériques de couplages multiphysiques et application aux calculs de transitoires du MSFR

Les études menées sur le MSFR se situent actuellement dans la phase de l'ingénierie conceptuelle. Les objectifs à ce niveau sont de définir les principaux composants et processus du réacteur et de démontrer le respect des critères de la génération IV, notamment à travers des analyses préliminaires de sûreté.

Une des caractéristiques spécifiques des réacteurs à sel fondu est le transport des précurseurs de neutrons retardés au sein du sel (thermo-hydraulique) et son impact sur la réactivité du réacteur (neutronique). Du fait de l'originalité du concept MSFR et de son combustible liquide en circulation, ces études conceptuelles nécessitent la mise au point de nouveaux modèles physiques et leur couplage avec des outils numériques performants. Ce besoin de modèles physiques plus adaptés est à replacer dans le contexte actuel de l'émergence d'une discipline de simulation numérique multi-physique et multi-échelle qui tire avantage des hautes performances des méthodes numériques et moyens de calcul actuels. Ces développements dépassent le cadre du seul réacteur à sels fondus et s'inscrivent dans le développement à terme d'un modèle global pour les réacteurs nucléaires dit de type « cœur numérique ». Dans le cas du réacteur à combustible liquide circulant, la géométrie relativement simple de la cavité du cœur rempli uniquement par le sel (sans crayons ni grilles) permet des simplifications numériques faisant de ce réacteur un objet de choix pour étudier de nouvelles approches multi-physiques et multi-échelles. Le développement de ces modèles a été réalisé lors de la thèse de doctorat d'A. Laureau soutenue fin 2015.

La partie centrale de ces travaux a consisté en la mise au point et la validation d'un outil de simulation 3D de transitoires, utilisant le code neutronique stochastique SERPENT et le code de mécanique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics) OpenFoam. Cet outil est basé sur la méthode originale des matrices de fission en transitoire ou TFM (Transient Fission Matrix). Les matrices de fission sont calculées une seule fois par le code SERPENT en amont puis utilisées directement dans le code de thermohydraulique où la méthode TFM a été implémentée, ceci afin de réaliser des calculs de transitoire de réacteurs combinant grande précision et temps de calcul raisonnable. Ce code a été utilisé pour l'étude de divers transitoires de fonctionnement normaux et accidentels du MSFR. Ces études ont démontré la grande stabilité du

MSFR d'un point de vue du fonctionnement du cœur, sa capacité à effectuer des suivis de charge en fonctionnement normal comme à réagir parfaitement à des insertions de réactivité accidentelles.

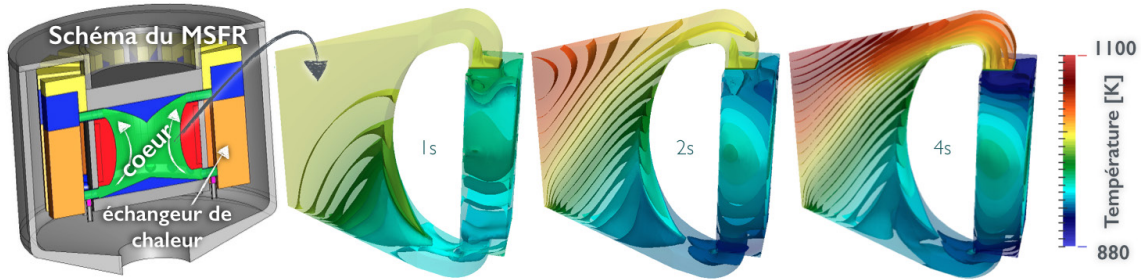


Fig. 1 : Évolution de la température durant un accident de sur-refroidissement du réacteur MSFR : entrée du sel combustible froid depuis l'échangeur (1 s), induisant une augmentation de la puissance et donc de la température en cœur (2-4 s).

Une application de ce code pour le calcul et l'étude d'un incident d'un sur-refroidissement du MSFR est illustrée sur la figure 1.

L'étude paramétrique présentée sur la figure 2 correspond à un accident de sur-refroidissement de 1 kW à 3 GW avec une constante de temps de réponse du circuit intermédiaire variant de 1 à 128 s pour évaluer l'impact de l'inertie de ce circuit. Avec une constante de temps de 16 s, le réacteur devient encore légèrement sur-critique prompt, mais l'excursion de puissance associée est limitée à 1,5 GW et la variation de température moyenne du combustible de 0,3 K en environ 0,1 s. Le régime sur-critique prompt est évité pour des constantes de temps supérieures à 32 s.

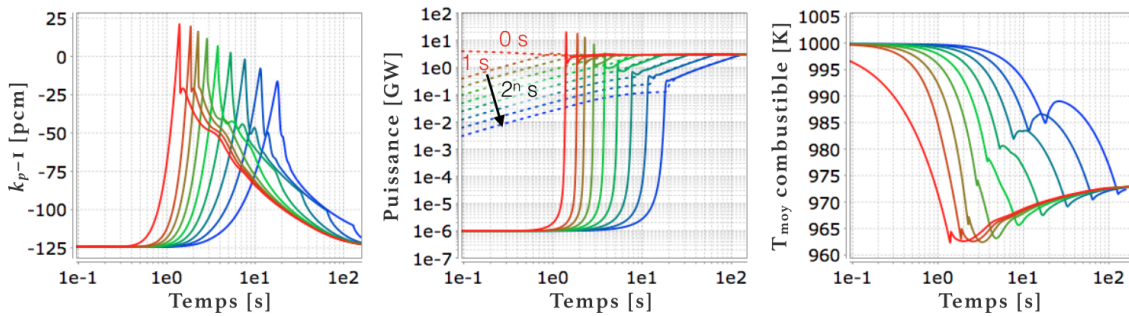


Fig. 2 : Évolution de la marge à la criticité prompt ($k_p - 1$), de la puissance extraite (traits pointillés) et produite (traits pleins) et de la température moyenne du sel combustible pour un transitoire de sur-refroidissement de 1 kW à 3 GW avec une constante de temps variant de 0 à 128 s.

Cette étude met en avant un cas menant au régime sur-critique prompt sur une base physique réaliste en partant d'une très basse puissance par exemple lors du démarrage du réacteur avec un sel neuf. Même si l'élévation de température durant la période sur-critique prompt reste très faible, le principal souci est sa variation rapide et l'effet sur les structures de la dilatation associée. Des études plus poussées nécessiteront une modélisation fine des échangeurs de chaleur permettant une prise en compte précise de la cinétique du refroidissement du fluide intermédiaire. L'introduction d'inertie dans les circuits combustible et intermédiaire, à étudier dans le cadre plus large des études de sûreté du MSFR, permettra de réduire l'occurrence et les effets de ce type d'accident à un niveau négligeable.

Le code TFM-OpenFOAM est utilisé pour réaliser diverses études de transitoires, notamment du MSFR mais également de réacteurs à combustibles solides tels des réacteurs à eau pressurisée. Il servira également de code de référence lors du développement d'un code système du MSFR dans le cadre du projet SAMOFAR.

Approche et études de sûreté du MSFR

Les études actuelles ont permis de caractériser le comportement du MSFR en fonctionnement normal et d'initier une approche de sûreté dédiée à ce type de réacteurs. Il ressort que le MSFR est d'une très grande stabilité et flexibilité. Il semble bien adapté pour assurer un suivi de charge de grande amplitude, pour incinérer les transuraniens de la filière actuelle ou encore pour supporter des situations de type Fukushima grâce à la possibilité de reconfigurer passivement le combustible de manière contrôlée et réversible via la vidange du cœur. Les méthodes récemment développées pour réaliser des simulations

réalistes du MSFR et le financement par Euratom du projet SAMOFAR orienté vers l'étude de sûreté du MSFR permettent d'envisager dans un futur proche des avancées significatives sur le design du MSFR.

Ceci s'inscrit dans la poursuite du travail préliminaire réalisé sur le développement d'une approche de sûreté du MSFR dans le cadre du projet Euratom FP7 EVOL et via un doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble soutenue en 2013, conduisant à une proposition de règles de sûreté fondamentales et à la transposition des principes de défense en profondeur. La méthodologie ISAM (Integrated Safety Analysis Methodology), développé par le groupe d'experts sur le risque et la sûreté du Forum International Génération 4, est en cours d'adaptation au cas du MSFR dans le cadre du projet SAMOFAR. En parallèle une méthodologie plus générale et non-spécifique aux réacteurs nucléaires, l'analyse systémique de risque, sera appliquée afin d'identifier les risques existants dans le MSFR au niveau du circuit combustible, puis dans la couverture fertile, le système de traitement des gaz, ainsi que les autres systèmes de traitement ou de stockage des matières radioactives. Cette description systémique du réacteur permettra de dresser un état des lieux des composants envisagés dans le MSFR ainsi que leur fonction. En se basant sur ces études, une identification des classes d'accidents potentiels sera établie.

Pour en savoir plus

- » *Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs*, A. Laureau, thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes (2015)
- » *Transient Fission Matrix: kinetic calculation and kinetic parameters β_{eff} and Λ_{eff} calculation*, A. Laureau, M. Auffero, P. Rubiolo, E. Merle-Lucotte, D. Heuer, *Annals of Nuclear Energy*, volume 85, p. 1035–1044 (2015)
- » *Physical Assessment of the Load Following and Starting Procedures for the Molten Salt Fast Reactor*, E. Merle-Lucotte, D. Heuer, M. Brovchenko, A. Laureau, M. Allibert, V. Ghetta, P. Rubiolo, *Actes de la conférence internationale ICAPP'2015, Nice, France* (2015)

Modélisation, Analyse, Prospective

M. Aufiero, A. Bidaud, N. Capellan, V. Ghetta, A. Laureau, O. Méplan, A. Nuttin, P. Prévot, P. Rubiolo, M. Tano-Retamales
J. Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques)

Ces activités sont organisées autour de trois axes principaux.

A. Développement d'outils académiques simples de cinétique spatiale et de thermo-hydraulique

For ten years, our Simulation Initiative for Reactors Improving Uranium savings and Safety margins (SIRIUS) has studied retrofit water reactors. While thorium-fueled standard CANDU is barely breeding, PWR finds it hard to reach such a high conversion level. From a comparative analysis, we have evaluated possible ways to achieve significantly higher conversion based on faster spectra. Burnup calculations of such High Conversion Water Reactor (HCWR) options have given promising fuel cycle results. Safety must now be assessed. This requires the development of new academic computing tools, coupling as simply as possible neutronics and thermal-hydraulics. During the last two years, essential validations have been performed for these two parts within our main tool MURE.

Validation de la Nodal Drift Method sur plusieurs transitoires

Après validation sur un LOCA (Loss Of Coolant Accident) de CANDU, notre méthode de cinétique spatiale appelée NDM (Nodal Drift Method) a été testée sur plusieurs transitoires du type REA (Rod Ejection Accident) propre aux REP. Notamment dans le cadre du PFE et du début de thèse de P. Prévot (2015-2018) dirigé par A. Nuttin, elle a fait l'objet de nombreuses améliorations portant aussi bien sur le schéma numérique que sur les modèles physiques employés.

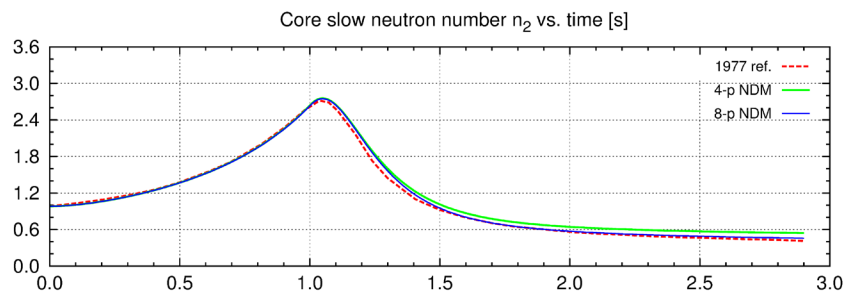


Fig. 1 : La NDM, avec une discrétisation adéquate, s'est toujours montrée en bon accord avec des calculs de référence bien plus complexes (comme ici pour le transitoire de type LOCA en CANDU).

Mise au point d'un modèle fin de thermo-hydraulique analytique

Dans la phase précédente de validation neutronique, les variations de température du combustible et du caloporteur sont calculées par thermique ponctuelle et leurs contre-réactions sur la réactivité prises en compte à l'aide de sections efficaces pré-tabulées. Le remplacement de cette modélisation limitée par une approche analytique plus fine, baptisée BATH (Basic Approach to Thermal-Hydraulics), est en cours. Ce travail sera couplé au calcul optimisé des données de diffusion des cœurs étudiés par MURE (MCNP Utility for Reactor Evolution), enrichi du code Serpent à l'occasion du stage de J. Hajnrych encadré par O. Méplan. Cela permettra d'évaluer la sûreté des réacteurs à eau retenus pour leurs performances neutroniques en cycle thorium. D'autres outils de neutronique et de thermohydraulique, bien plus détaillés, dits « best estimate » sont développés par ailleurs au sein du groupe, et pourront également y contribuer.

B. Modèles multi-physiques best estimate pour les futurs réacteurs

The principal objective of a Multiphysics approach is to provide an accuracy model of a nuclear system that is able to predict most of the physical phenomena taking place in the reactor. Building a multi-physics model usually requires the coupled resolution of the neutron transport, the thermal hydraulics and thermal mechanics aspects and the material behavior of various reactor components. Developing such approach possess a significant challenge because some physical process are not well known, the complex interactions between the reactor phenomena and the computing effort required by the numerical resolution. Nevertheless, possibility of assessing some phenomena that are difficult to study in experiments has drawn significant attention to the Multiphysics approaches. In the past two years the main effort has been directed towards the development of coupled neutronics thermal hydraulics transient models. The extension of such approach to other type of reactor designs and the validation of some thermos-hydraulics models is underway.

Couplages neutronique thermo-hydraulique transitoires et au-delà

Ces travaux ont été initiés dans le cadre de la thèse d'A. Laureau (2012-2015) codirigé par P. Rubiolo, par le développement d'une nouvelle approche pour les calculs de neutronique en transitoire basée sur l'utilisation des matrices de fission (méthode appelée TFM pour Transient Fission Matrices). Les TFM permettent de caractériser la réponse d'un milieu multiplicatif dans le temps et en espace avec une grande précision. Ce modèle de neutronique a été couplé à un modèle de thermo-hydraulique CFD de type RANS (Reynolds Average Navier Stokes equations) et utilisé pour diverses applications (réacteur MSFR, expérience GODIVA et des géométries simples). Les activités se poursuivent afin de développer de nouveaux modèles couplés qui permettront d'étudier d'autres systèmes critiques. L'équipe participe également au développement d'outils de propagation d'incertitudes dans ces modèles, par exemple en lien avec les données nucléaires.

Développement de modèles numériques pour les caloporteurs de type sels fondus à haute température et validation expérimentale

Cette action initiée fin 2014 s'inscrit dans le cadre du WP3 du projet européen SAMOFAR et fait l'objet de la thèse de M. Tano-Retamales (2015-2018) dirigé par P. Rubiolo. Le travail est focalisé principalement sur le développement de modèles théoriques décrivant précisément les phénomènes thermiques microscopiques existant dans des caloporteurs à très haute température et de les qualifier sur des expériences qui seront menées sur la plateforme SWATH du LPSC. Les résultats devront permettre de valider les principes du système de vidange du réacteur MSFR. La stratégie adoptée pour développer les modèles et la plateforme SWATH est schématisée sur la figure 2.

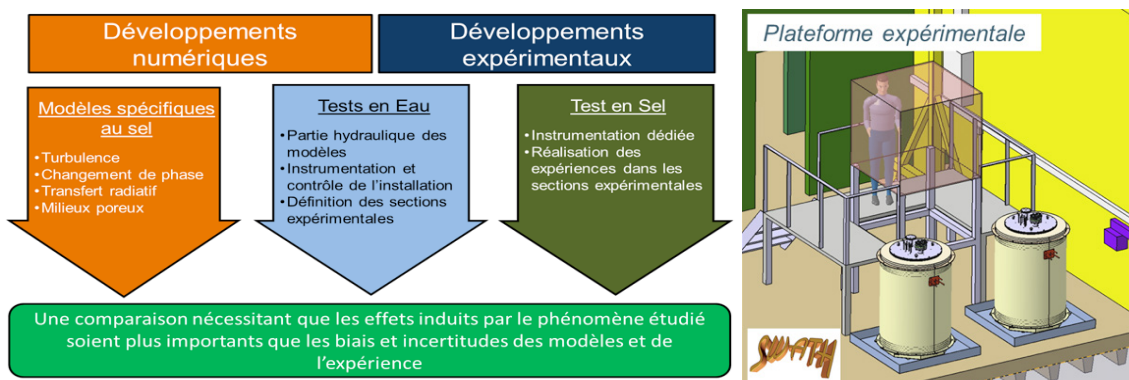


Fig. 2 : Validation des modèles thermo-hydrauliques dans la plateforme SWATH.

C. Études de scénarios technico économiques

L'équipe participe à l'intégration de nouvelles bases de données réacteurs dans CLASS l'outil de simulation de parc nucléaire du CNRS et de l'IRSN. Par ailleurs, des collaborations importantes existent avec des géologues spécialistes de l'uranium et des économistes de l'énergie, dans le but d'améliorer la compréhension des liens entre les politiques de réduction des émissions de CO₂, la raréfaction des

ressources fossiles, et de quantifier l'impact des nouvelles énergies renouvelables et la gestion des matières nucléaires dans les scénarios.

Pour en savoir plus

- » *Validation of the minimalistic Nodal Drift Method for spatial kinetics on a simple CANDU LOCA benchmark*, A. Nuttin, P. Prévot, N. Capellan et al., *Annals of Nuclear Energy* 88 (2015) 135-150
- » *Transient Fission Matrix: Kinetic calculation and kinetic parameters β_{eff} and Λ_{eff} calculation*, A. Laureau, M. Aufiero, P.R. Rubiolo, E. Merle-Lucotte, D. Heuer, *Annals of Nuclear Energy* 85 (2015), 1035–1044
- » *A collision history-based approach to sensitivity/perturbation calculations in the continuous energy Monte Carlo code SERPENT*, M. Aufiero, A. Bidaud, M. Hursin, J. Leppänen, G. Palmiotti, S. Pelloni, P. Rubiolo, *Annals of Nuclear Energy* 85 (2015), 245-258

Développement du détecteur TraDeRa

Y. Arnoud, R. Delorme, R. Fabbro, M.-L. Gallin-Martel, O. Rossetto

B. Boyer, L. Gallin-Martel, J.-L. Bouly (Service Électronique)

J. Menu (Service Études et Réalisations Mécaniques)

A. Pelissier (Service Détecteurs et Instrumentation)

J. Odier (Service Informatique)

An innovative Transparent Detector for Radiotherapy (TraDeRa) has been developed. The detector aims at real-time monitoring of modulated beam ahead of the patient during delivery sessions, with a field cover up to 40 x 40 cm². It consists in a pixelated matrix of ionization chambers with a patented electrodes design. An in-house designed specific integrated circuit allows extracting the signal and provides a real-time map of beam intensity and shape, at the Linac-pulse scale. The current version of TraDeRa shows promising results for intensity-modulated radiotherapy quality assurance (QA), enabling real-time monitoring of the beam and high sensitivity for errors detection. The attenuation is small enough to not hinder the irradiation while keeping the beam upstream of the patient under constant control. A final prototype under development will include 1600 independent electrodes with acquisition systems and data transmission embedded on the device, removing all external dependencies and improving the compactness of the whole system.

Le projet de profileur de faisceau TraDeRa

La mise en œuvre de nouvelles techniques d'irradiation externe en radiothérapie, comme le masquage dynamique du faisceau combiné au déplacement de la tête du système d'irradiation autour du patient, permet un dépôt de dose plus précis au niveau des tissus à traiter. Ces techniques complexes mettent en œuvre un accélérateur linéaire d'électrons qui, après impact dans une cible, délivre le faisceau de photons X utilisé pour irradier le patient. Le débit de la machine et le centrage du faisceau est basé sur un système complexe de contre-réaction. D'autre part, le masquage dynamique du faisceau repose sur le déplacement de lames jointives en tungstène, placées à la sortie de la tête d'irradiation. Cependant, même si la position des lames et l'intensité du faisceau sont vérifiées en interne régulièrement, il arrive encore plusieurs fois par an des incidents d'irradiation au cours du traitement où les systèmes de contrôle des machines commerciales laissent passer des faisceaux non conformes.

C'est dans ce contexte que nous avons initié le développement d'un détecteur de photons X, quasi transparent, en collaboration avec le service de radiothérapie du centre hospitalier universitaire de Grenoble Michallon. Le détecteur est placé en sortie de l'accélérateur et en amont du patient, afin de contrôler de manière indépendante les caractéristiques des faisceaux et de les enregistrer tout au long des séances de traitement.

Un prototype opérationnel, avec son électronique d'acquisition embarquée, a été conçu au laboratoire. Il consiste en une matrice de 324 chambres d'ionisation, la taille des électrodes ayant été optimisée au vu des traitements couramment pratiqués en radiothérapie. Ce design original a donné lieu à un dépôt de brevet. L'acquisition des très faibles signaux repose sur un ensemble d'ASICs à intégration de charges conçus au LPSC. Un travail intensif de protection contre les perturbations électromagnétiques a été nécessaire, l'environnement de la radiothérapie étant particulièrement bruyant à cause de la présence d'un klystron dans l'accélérateur d'électrons alors que les signaux générés par le passage des photons X dans le détecteur sont très faibles. Des caractérisations sous faisceaux de radiothérapie ont permis de montrer que la précision de notre système est aussi bonne que celle d'une chaîne commerciale de dosimétrie (chambre d'ionisation quasi ponctuelle + électromètre) et apporte en plus la mesure en 2D et en temps réel des caractéristiques du faisceau à chaque impulsion du système d'irradiation (toutes les 5 ms).

Un système d'accroche développé par le Service Mécanique permet de positionner le détecteur juste en sortie de la tête d'irradiation.

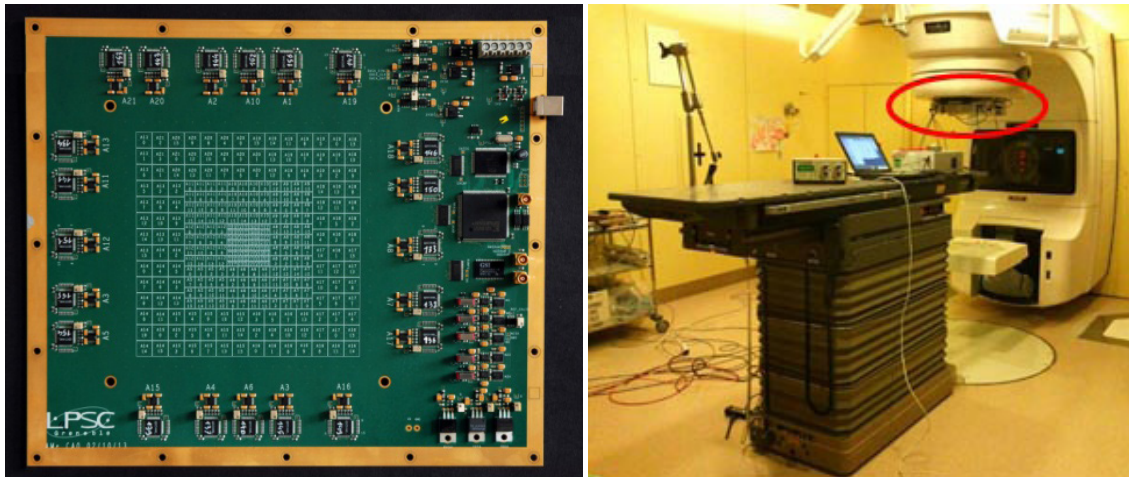


Fig. 1 : Prototype 324 voies (gauche) et test sur Linac au CHU-Grenoble (droite).

Les séries d'images ainsi acquises sont très riches en information. Le détecteur permet d'ores et déjà de mettre en évidence très finement des défauts sur la position des lames, après un traitement statistique qui repose sur les écarts entre images, pondérés des erreurs de mesure.

Ainsi, la comparaison de deux traitements où l'une des lames est décalée d'un millimètre montre un désaccord permettant de cibler parfaitement la zone de non-conformité.

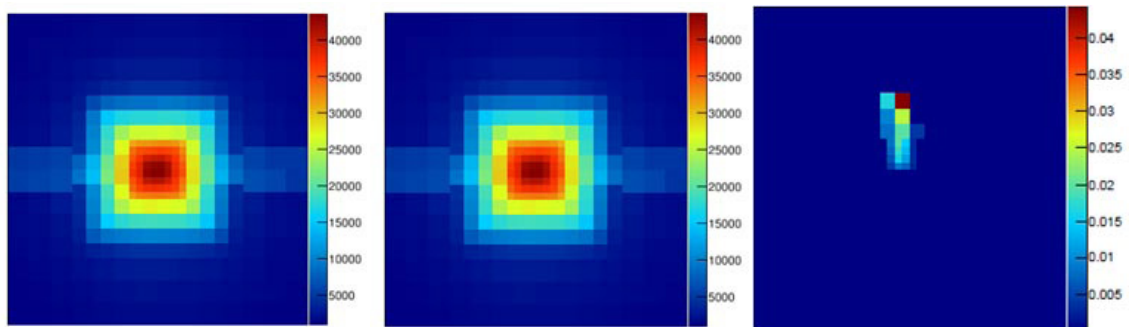


Fig. 2 : Comparaison de 2 acquisitions dynamiques a priori similaires, conduisant à un dépôt dosimétrique en forme de pyramide dans le détecteur : référence à gauche et acquisition biaisée (lame centrale décalée d'un millimètre) au milieu. La carte des différences à droite met en évidence dans ce cas des écarts relatifs allant jusqu'à 4%.

Ces excellents résultats nous ont conduits à la mise en œuvre d'un nouveau détecteur couvrant la totalité des champs d'irradiation, jusqu'à une surface de $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Si les ASICs de la première génération ont été conservés au vu de leurs très bonnes performances, le passage de 324 à 1600 chambres d'ionisation a conduit à un nouveau concept de l'électronique de traitement des données. Ce nouveau détecteur auto alimenté est en fin de développement et transmettra sans fil les informations (charges de chacune des électrodes, inclinaison de la tête de l'accélérateur pendant sa rotation, etc.) à une station distante, garantissant une perturbation minimale et une indépendance totale des mesures.

Étalonnage

Si le système permet la détection des défauts d'irradiation par comparaison relative, il doit aussi permettre une mesure absolue des inhomogénéités des faisceaux d'irradiation. Le suivi régulier des faisceaux permettrait ainsi de relever des dérives lentes des systèmes d'irradiation, qui passent inaperçues lors des contrôles qualité journaliers effectués en milieu clinique. À cette fin, le détecteur doit être étalonné le plus précisément possible. En particulier, la réponse des 1600 voies doit être harmonisée de façon à obtenir une réponse identique de chacune des voies sous une irradiation uniforme.

Pour pallier l'absence de faisceau de référence uniforme de dimensions importantes, nous avons développé un banc d'étalonnage original utilisant une source de radiothérapie quasi-ponctuelle de cobalt 60, normalement utilisée pour des traitements de Curiothérapie à haut débit de dose. Le principe est de balayer très régulièrement (ligne par ligne) la surface du détecteur, qui est ainsi exposé uniformément.

ment à une irradiation constante puisqu'issue d'une source radioactive à durée de vie longue. Le banc de mesure piloté par des moteurs linéaires de très haute précision est opérationnel depuis peu, et une séance d'acquisition en salle de traitement à l'hôpital a fourni les premières données qui vont nous conduire vers la normalisation absolue de la réponse des 1600 voies de l'électronique, avec une précision attendue de l'ordre du pourcent.

Modélisation de la dose

À terme, au-delà de la mise en évidence de défauts, les données du détecteur visent à fournir une estimation de la dose dans le patient. Cette information est obtenue indirectement à partir des données du détecteur et nécessite de connaître précisément les caractéristiques de l'accélérateur utilisé pour l'irradiation, en particulier par la connaissance des paramètres du faisceau d'électrons : énergie moyenne, dispersion et taille de la tache focale sur la cible de génération des photons X. De ces grandeurs dépendent la répartition spectrale et spatiale du faisceau d'irradiation X et des rayonnements secondaires émis par la tête de l'accélérateur, qui influencent notablement la réponse du détecteur. Or les données fournies par les constructeurs lors de l'installation d'une machine sont trop peu précises pour le degré de précision que nous recherchons.

Un travail original, effectué dans le cadre d'une thèse, permet d'obtenir précisément et en quelques minutes les paramètres du faisceau d'une machine donnée à partir des relevés dosimétriques dans une cuve à eau. Cette méthode est basée sur une minimisation entre les observables dans la cuve à eau et les mêmes grandeurs issues d'une modélisation massive de la réponse de l'accélérateur, pour différents jeux de paramètres. Dans cette méthode, c'est la simulation d'un grand nombre de cas dans l'espace des 3 paramètres qui prend du temps. Ces simulations sont stockées dans une base de données. Une fois les simulations obtenues pour un type d'accélérateur, l'algorithme donne très rapidement les paramètres d'un modèle spécifique. La robustesse de la méthode a été testée avec succès à partir de configurations générées par Monte Carlo, et appliquée aux données d'accélérateurs de plusieurs services de radiothérapie (Grenoble, Chambéry, Lyon).

À terme, la connaissance précise des paramètres d'un accélérateur permettra l'association entre les données de chacune des 1600 voies du détecteur, qui dépend sensiblement des caractéristiques du faisceau, et la dose déposée dans un volume aval qui pourra être transposé dans le patient.

Cette dose pourra être comparée aux objectifs thérapeutiques planifiés et les traitements ultérieurs adaptés en conséquence si des écarts notables sont mis en évidence.

Le système dans sa globalité sera un atout dans les traitements de radiothérapie, par le suivi constant et la traçabilité tout au long des séances de traitement.

Pour en savoir plus

- » <http://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupes-de-physique/enjeux-societaux/interface-medicale/tradera>
- » Brevet FR N° 13/54339
- » R. Delorme, Y. Arnoud, R. Fabbro, B. Boyer, O. Rossetto, L. Gallin-Martel, M.-L. Gallin-Martel, A. Pelissier, I. Fonteille, and J. Giraud, J. SU-D-213-01: Transparent Photon Detector For The Online Monitoring Of IMRT Beams. *Medical Physics*, 42, 3206-3206 (2015)

Accelerator Based - Neutron Capture Therapies (AB-NCT)

D. Dauvergne, R. Delorme, V. Ghetta, P. Rubiolo, D. Santos, N. Sauzet
O. Guillaudin, J.-F. Muraz (Service Détecteurs et Instrumentation)
J. Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques)

The NCT works by introducing into the tumor cell a carrier molecule with an atomic nucleus having a very high neutron capture cross section for thermal neutrons. The NCT development is very limited compared to other therapies due to the great difficulty of access to epithermal neutron sources. Accelerator-Based (AB) neutron sources are the best choice, now available. Since January 2014, the LPSC team works on different crucial aspects of an innovative AB-NCT facility: The targets, the moderator and fast neutron detection. The collaboration includes researchers in the CHU-Grenoble, the Institut Laue-Langevin and the Institut Albert Bonniot.

Contexte du nouveau projet émergent

Depuis janvier 2014, l'équipe du LPSC travaille sur un projet interdisciplinaire qui essaie de valoriser plusieurs savoir-faire du laboratoire et de l'IN2P3 sur une thérapie pour le cancer basée sur la capture neutronique et utilisant des accélérateurs compacts. Le principe de la thérapie par capture neutronique est d'introduire à l'intérieur des cellules tumorales des molécules comportant des noyaux atomiques de ^{10}B ou de ^{157}Gd , qui ont une très grande section efficace de capture pour les neutrons thermiques, et qui vont provoquer soit la fragmentation de noyaux de ^{11}B (BNCT) soit l'émission de nombreux électrons de basse énergie (électrons Auger ou de conversion) ce qui crée une très forte dose locale (GdNCT). Dans le cas de la BNCT, quand le patient reçoit un faisceau intense de neutrons épithermiques ($E < 10$ keV), des doses létales sont délivrées aux tissus tumoraux par les particules α et les ions ^7Li produits lors de la réaction de capture $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Grâce à la sélectivité du composé porteur de ^{10}B et au parcours réduit des particules produites (~ 5 μm), comparable à la taille de la cellule, les dommages sont majoritairement localisés dans les tissus tumoraux. Les situations cliniques pour lesquelles l'utilisation de cette technique aurait un intérêt sont nombreuses : tumeurs primaires du cerveau à haut grade de malignité, invasions multimétastasées limitées à un seul organe tel que le foie, les poumons ou le cerveau.

Le développement de la NCT dans le monde est très limité car jusqu'à présent, les essais cliniques ne pouvaient s'effectuer que sur réacteurs nucléaires. Des perspectives d'expansion s'ouvrent grâce à des sources de neutrons basées sur accélérateurs. Les développements récents de sources d'ions à fort courant, couplées à des accélérateurs compacts de proton/deuteron de basse énergie ($\sim 1,5$ MeV), permettraient de produire les hauts flux de neutrons épithermiques nécessaires à la thérapie. Des projets avancés d'AB-BNCT existent au Japon, en Italie, Angleterre, Israël, Russie et Argentine.

Démarrage du projet au laboratoire

De nombreux problèmes doivent être résolus avant d'envisager l'installation de ce type d'appareil dans un hôpital. Outre le couplage d'une source d'ions à courant élevé (~ 10 - 20 mA) à un accélérateur compact, la cible doit produire un flux de neutrons suffisamment élevé qui après modération doivent être épithermiques et, après pénétration et thermalisation dans le patient, de l'ordre de 10^9 n/cm²/s sur la position de la tumeur. Les cibles de production de neutron (basées sur l'utilisation de Be ou Li) sont une partie cruciale des installations AB-NCT puisqu'elles doivent rester fiables dans des conditions de fonctionnement assez extrêmes.

L'équipe du LPSC a produit à ce sujet depuis les deux dernières années les travaux suivants :

- Un design original d'une cible tournante de ^9Be (voir figure 1).
- Un design original et des calculs thermiques et hydrauliques d'une cible de ^7Li liquide.
- Un design d'une ligne de faisceaux d'électrons (100 mA) afin de tester le comportement thermique de modèles de cible à taille réduite (voir figure 2).
- La caractérisation expérimentale, en collaboration avec une équipe argentine, des neutrons rapides produits par la réaction $^9\text{Be}(d(1,45\text{ MeV}),n)$. L'expérience a été réalisée en octobre 2015 à Legnaro (Italie).

- L'organisation d'un workshop international qui a eu lieu au LPSC en octobre 2015 (<https://lpsc.in2p3.fr/Indico/internalPage.py?pageId=0&confId=1299>).

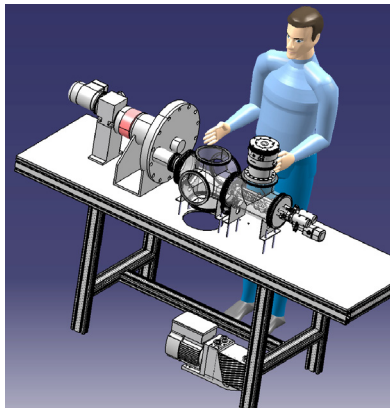
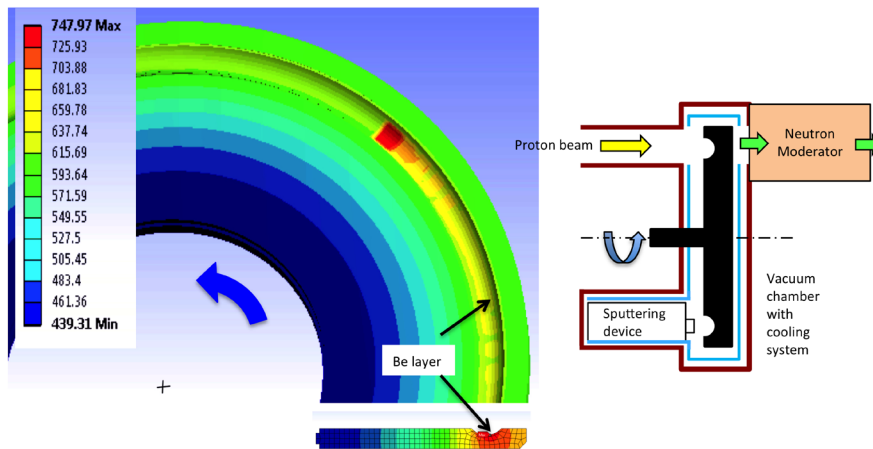


Fig. 1 (ci-dessus) : Design d'une cible tournante en graphite revêtue de ^9Be dans la zone d'impact du faisceau de deutons. L'ensemble comporte un système de sputtering (système proposé par P. Sortais) pour assurer la permanence du dépôt. La température de la zone d'impact du faisceau atteint 750°C . La cible est refroidie par rayonnement.

Fig. 2 (ci-contre) : Il est important de déterminer le comportement thermique de la zone impactée par le faisceau de deutons. Ceci sera testé en utilisant un faisceau d'électrons (100 mA) sur un modèle de cible à taille réduite (diam. 30 cm). La figure présente le design de la ligne de test prévue.

MoniDiam : Étiquetage faisceau en hadronthérapie par diamants polycristallins de grande surface

A. Bes, J. Collot, D. Dauvergne, M.-L. Gallin-Martel, A. Gorecki, J.-Y. Hostachy, A. Lacoste, O. Rossetto
G. Bosson, L. Gallin-Martel, F. Rarbi, M. Yamouni (Service Électronique)
J.-F. Muraz (Service Détecteurs et Instrumentation)
M. Baylac, S. Rey, F. Villa (Pôle Accélérateurs)

The MoniDiam project is part of a French national collaboration for the online monitoring of hadron therapy, based on the imaging of nuclear fragmentation products. The goal here is to provide large area detectors with 100% detection efficiency for carbon or proton beams, with time and position identification at count rates greater than megahertz. This can be achieved with polycrystalline diamond detectors. Commercial diamond material is processed into detectors at the LPSC, involving plasma etch thinning, contact metallization, and laboratory testing of leakage current, charge collection distances using alpha and beta radioactive sources, and signal processing with fast readout. These studies prefigure dedicated microelectronics developments.

Objectifs et contexte

L'objectif du projet MoniDiam est d'effectuer les études préliminaires nécessaires à la mise au point d'un système de monitoring en ligne de l'hadronthérapie, à l'aide de détecteurs diamant minces et de grande surface.

Ce système doit répondre à la problématique d'un étiquetage temporel des ions ou paquets d'ions dans le cadre de l'hadronthérapie. Cet étiquetage est nécessaire pour un contrôle qualité basé sur la détection des rayonnements secondaires (gamma prompts, protons secondaires). En effet, un des enjeux actuels pour l'amélioration de la qualité de cette modalité de traitement à forte précision balistique est de pouvoir contrôler en temps réel le parcours des ions en ligne, afin de réduire les marges appliquées lors de la planification en raison des incertitudes sur ce parcours. La collaboration CLaRyS répond à cette problématique en développant les différentes modalités d'imagerie en ligne, dont le système d'étiquetage de faisceau est un élément commun ; cette collaboration regroupe le LPSC, l'IPNL-Lyon, le LPC-Clermont, le CPPM-Marseille, le LIRIS-Lyon, le CREATIS-Lyon et le Centre Antoine Lacassagne à Nice. Ces travaux sont menés dans le cadre de l'infrastructure nationale France Hadron et du Labex PRIMES.

Les détecteurs diamant CVD (Chemical Vapor Deposition), mono- ou poly-cristallins, présentent un certain nombre d'atouts pour répondre à ces problématiques : un numéro atomique faible et similaire à celui des tissus vivants, ils sont également radiorésistants, c'est-à-dire qu'ils pourront être soumis à des irradiations cliniques prolongées (à l'échelle de plusieurs années), et enfin leurs propriétés électroniques (conductivité thermique, grand gap électronique, mobilité des charges importante et faible capacité) en font des détecteurs très rapides et à bas bruit à température ambiante. Cependant, seuls les diamants polycristallins sont disponibles avec de grandes surfaces nécessaires à cette application. Néanmoins, le projet MoniDiam est complémentaire du projet ANR MonoDiam auquel le laboratoire contribue, et qui est orienté vers les tests de détecteurs monocristallins pour la physique des hautes énergies. Ces deux projets ont permis une mise en commun de leurs ressources.

Réalisations

Le projet MoniDiam a été initié en 2014 grâce au financement OncoStarter du CLARA, qui a permis d'acquérir des échantillons, de réaliser leur métallisation au sein du groupe Plasmas, d'effectuer des mesures sur faisceau, avec un premier test sur GENEP12 au LPSC puis au GANIL, de mettre en place au laboratoire un banc de test avec source alpha (^{241}Am), qui vient compléter le banc existant avec source beta (^{90}Sr). Ces deux types de sources permettent d'étudier les réponses à un dépôt d'énergie en surface ou uniformément réparti en profondeur, ce qui donne accès à la fois aux distances de collection de charge et à leurs temps de dérive. La réponse très rapide des détecteurs (fronts de montée liés à la collection de charges inférieurs à la nanoseconde pour des épaisseurs de 500 μm) nécessite une chaîne d'acquisition adaptée. La figure 1 illustre le montage adapté 50 Ω d'un détecteur de 2 x 2 cm^2 .

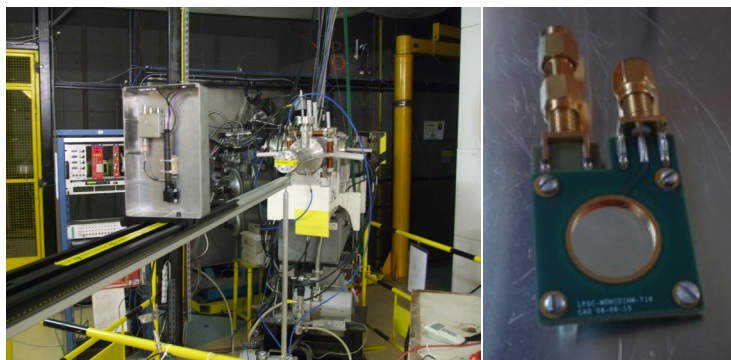


Fig. 1 : Gauche : Dispositif expérimental sur GENEPI2. Droite : Détecteur diamant polycristallin monté dans son support avec adaptation d'impédance.

Une journée d'atelier de travail a été organisée en juin 2015, regroupant les différents acteurs du domaine en France. Une réflexion s'est mise en place avec le Service Électronique afin de définir les caractéristiques nécessaires d'un détecteur multivoies, pour tous les types d'applications.

La qualité des diamants CVD disponibles actuellement n'est pas encore optimale pour une utilisation directe, et le transfert vers des applications cliniques requiert encore des développements amont, qui seront soutenus en particulier par le projet Protobeamline de France Hadron dans les années à venir.

Pour en savoir plus

- » Journée d'étude sur les détecteurs diamants, juin 2015
- » <http://lpsc.in2p3.fr/Indico/conferenceDisplay.py?confId=1285>

