

3 Énergie et santé

Cette thématique regroupe les activités de trois équipes de recherche du laboratoire : Physique des Réacteurs, MSFR (Molten Salt Fast Reactor) et Physique pour les Applications Médicales. Elle englobe plusieurs projets ainsi qu'une activité de recherche de l'équipe MIMAC intitulée « Neutrons pour la Science et la Société ». En effet, le caractère transdisciplinaire de ces activités allie des chercheurs et personnels techniques de plusieurs autres entités au sein du LPSC.

Le principal objectif scientifique de l'équipe de Physique des Réacteurs est l'étude académique de systèmes innovants pour la production d'énergie, la sûreté et la transmutation des déchets. Ceci est décliné à travers trois thèmes principaux : les données nucléaires, la physique des réacteurs expérimentale et le développement et la validation de modèles. Les aspects technico-économiques sont également abordés.

La connaissance des données nucléaires et de leurs incertitudes est primordiale : elles sont à la base de toutes modélisations et études de sensibilités. L'étude des fragments de fission auprès du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL et le développement de méthodes innovantes de propagation des incertitudes et la détermination de leurs corrélations permettent d'obtenir des observables importantes pour la physique des réacteurs et de tester le pouvoir prédictif de certains modèles utilisés dans les évaluations. Elles sont également liées à la sûreté via une meilleure connaissance de la puissance résiduelle. L'étude de faisabilité d'un nouveau spectromètre, le projet FIPPS (Fission Product Prompt gamma - ray Spectrometer) de l'ILL, est en cours ; il permettrait de compléter ces mesures par l'étude des propriétés des particules promptes (n ou gamma) issues de la fission.

Depuis sa création, le groupe de physique des réacteurs est impliqué dans l'étude des ADS (Accelerator Driven System). Dans le cadre du projet européen MYRTE, programmé en support aux études de conception du réacteur MYRRHA dans le cadre d'EURATOM H2020, des expériences sur le monitoring de la réactivité d'un réacteur sous-critique se poursuivent. Le groupe participe également au projet MYRACL qui a pour objectif de tester l'applicabilité des méthodes de mesure de réactivité développées pendant les programmes antérieurs dans des situations plus proches de la réalité d'un ADS de puissance, piloté par un accélérateur Linac. Les expériences liées à ces projets ont lieu auprès de l'installation GUINEVERE du SCK-CEN, située à Mol en Belgique. Par ailleurs, l'analyse des données acquises pendant le projet FREYA, conclu en 2016, se poursuit. L'essentiel des efforts porte désormais sur l'amélioration de la méthode k-prompt.

L'étude de systèmes innovants ne peut se faire sans modélisation qui est structurée autour de trois axes principaux : le développement d'outils académiques simples de cinétique spatiale et thermo-hydraulique, la mise au point de modèles multi-physique pour les futurs réacteurs et les études de scénarios technico-économiques. Des expériences centrées sur les effets thermo-hydrauliques dans les sels fondus et associées aux études des modèles multi-physique (expériences FFFER et SWATH) sont développées.

L'équipe MSFR étudie le concept éponyme 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.

Les activités de l'équipe Physique pour les Applications Médicales s'articulent autour de trois thèmes : le monitoring de faisceaux de photons (TraDeRa), le monitoring en ligne de radiothérapies innovantes (hadronthérapie, radiothérapie par rayonnement synchrotron) avec le développement de détecteurs diamant rapides (hodoscope faisceau / CLaRyS - Ultra Fast Timing) et les simulations pour les radiothérapies ciblées.

Toutes ces activités ont en commun de s'inscrire dans un contexte collaboratif local, avec des partenaires cliniques tels que le CHU de Grenoble, en s'appuyant sur les infrastructures expérimentales telles que l'institut Néel, 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, ces activités sont fédérées par le GDR MI2B.

Les projets menés 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 à vérifier la qualité de leur délivrance. La réponse qu'ils tentent 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 -Radiothérapie Conformationnelle par Modulation d'Intensité- ou en radiothérapie synchrotron), soit par une radiosensibilisation au moyen de molécules vectorisées en NCT (Neutron Capture Therapy, en lien avec le projet ci-dessous), ou de nanoparticules, augmentant de façon très localisée le dépôt de dose.

Enfin, une nouvelle activité du laboratoire est apparue sous la forme d'un projet transverse à plusieurs équipes. Formellement né de l'équipe MIMAC, ce projet « Neutrons pour la Science et la Société » a été formellement initié en 2017. Elle s'articule autour de trois axes : le développement de cibles pour la production neutronique à haut flux basée sur accélérateurs (CANS : Compact Accelerator Neutron Sources), la problématique de thermalisation des neutrons rapides produits au niveau de la cible afin de définir un profil énergétique en fonction de l'application envisagée et la spectroscopie du champ neutronique produit au niveau de la cible et après le modérateur. Deux cibles différentes, en Béryllium et en Lithium ont été développées pour une application en NCT basée sur accélérateur. Une ligne expérimentale de test thermique des cibles a été développée et montée au LPSC. La NCT est actuellement peu développée principalement en raison de la grande difficulté de pouvoir accéder à des sites de réacteurs nucléaires adaptés à un environnement clinique. Le projet AB-NCT propose donc d'utiliser un ensemble formé d'une source d'ions en utilisant un faisceau de protons ou de deutons, d'un accélérateur compact, d'une cible capable de résister aux puissances envisagées et d'un modérateur adapté.

3.1 Équipe Physique des réacteurs

Équipe de recherche : membres permanents

A. Bidaud, A. Billebaud, N. Capellan, S. Chabod, V. Ghetta, G. Kessedjian, O. Méplan, A. Nuttin, M. Ramdhane, P. Rubiolo, C. Sage

Équipe de recherche : doctorants et postdoctorants

J. Blanco, S. Jamet (post-doc EDF), S. Julien-Laferrrière, P. Lopez, P. Prévot, M. Tano-Retamales,

Personnels des services techniques ou pôle

M. Baylac, P. Boge, T. Cabanel, E. Froidefond, E. Labussière, S. Rey (pôle accélérateurs et sources d'ions)

J. Giraud, J. Menu, S. Roudier, Y. Odièvre (Service Études et Réalisations Mécaniques)

O. Zimmermann, M. Heusch, J. Marpaud (Service Détecteurs et Instrumentation)

J. Bouvier, D. Tourrés (service électronique)

G. Dargaud (service informatique)

3.1.1 Introduction

La diversité des futurs envisagés pour le nucléaire dans le monde est frappante. La situation du Japon, où les réacteurs sont presque tous à l'arrêt, contraste avec celle de la Chine voisine, qui construit ou envisage de construire des réacteurs de tous types. On ne voit donc pas comment cette diversité de trajectoires, aux multiples facteurs, pourrait converger vers une stratégie unique, qui plus est aux échelles de temps longues du nucléaire. En fonction des objectifs techniques (économie des ressources, gestion des flux ou stocks de matières radioactives), des contraintes économiques et des choix politiques, une grande variété de filières de réacteurs nucléaires innovants est envisagée. Le CNRS, acteur majeur de la recherche française, a donc un rôle important à jouer dans l'étude de ces nouveaux réacteurs. Entre autres verrous technologiques et scientifiques, le déploiement de ces concepts nécessite l'acquisition de données nucléaires à un niveau de précision élevé. Depuis le milieu des années 1990, l'IN2P3 a mis à contribution ses compétences en mesures de données nucléaires pour participer entre autres aux recherches en lien avec les lois françaises sur les stratégies de gestion des déchets nucléaires. L'Institut a également développé des expertises en physique des réacteurs, plus particulièrement sur les réacteurs pilotés par accélérateurs (ADS, Accelerator Driven Systems), et les réacteurs utilisant le cycle thorium, dont font partie les réacteurs à sels fondus (MSFR, Molten Salt Fast Reactors).

Ces dernières années, le groupe de physique des réacteurs du LPSC, avec le support des services techniques du laboratoire, a apporté des contributions essentielles aux expériences

- de mesure de réactivité en ligne d'un ADS, auprès de l'installation GUINEVERE,

- de mesure de données nucléaires de précision en lien avec l'étude de la fission, auprès du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL,

- par la construction de dispositifs mettant en jeu des fluorures liquides en milieu statique ou dynamique (plateforme SWATH).

En parallèle, le groupe mène des études multi-physiques complètes de réacteurs existants ou de concepts en développement, afin de prédire aussi finement que possible leur comportement. En fonction des besoins, le groupe utilise des codes de calcul génériques (e.g., MCNP, SERPENT, DRAGON, OPENFOAM) ou développe ses propres outils (e.g. MURE). En appui aux études systèmes, le groupe contribue au développement d'outils d'études de la physique de l'aval du cycle du combustible à l'échelle d'un parc utilisant différents types de réacteurs. De plus, le groupe porte des études pluridisciplinaires d'économie de l'énergie focalisée sur l'économie du nucléaire avec une équipe d'économistes grenoblois et avec des géologues du CNRS spécialistes de l'uranium.

Depuis 2017 l'activité dédiée au système MSFR se poursuit dans une équipe séparée. Par souci de clarté et pour éviter les redites, cette activité ne sera détaillée que par l'équipe MSFR, bien que les travaux antérieurs à 2017 aient été menés au sein de l'équipe de Physique des Réacteurs.

3.1.2 Données Nucléaires

Problématique des rendements de fission

Le groupe a défini, puis fait évoluer, son programme de recherche sur les rendements de fission en associant un volet évaluation en complément du programme expérimental principalement à l'ILL en collaboration avec le CEA (Saclay et Cadarache). De telles données sont en effet cruciales pour l'évaluation de plusieurs

observables utiles pour la physique des réacteurs et les applications. Par ailleurs, elles revêtent également une importance plus fondamentale concernant l'étude du processus de fission. La recherche de précision et la détermination des corrélations d'incertitudes imposent des contraintes sur les modèles de fission et testent le pouvoir de prédiction de ces derniers. En outre, l'étude des rendements de fission en fonction de leur énergie cinétique donne une information indirecte sur les distributions en spin et en énergie d'excitation disponible lors de la scission, observable clé dans l'évaluation des données nucléaires.

Observables de fission

Les travaux effectués concernent notamment les mesures de rendements en masse, en charge, en isomères issus de la fission induite par neutrons thermiques (principalement la région contenant les $^{233,235}\text{U}$, $^{239,241}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{245}Cm , ^{251}Cf) 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 mesures et d'analyses, 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.

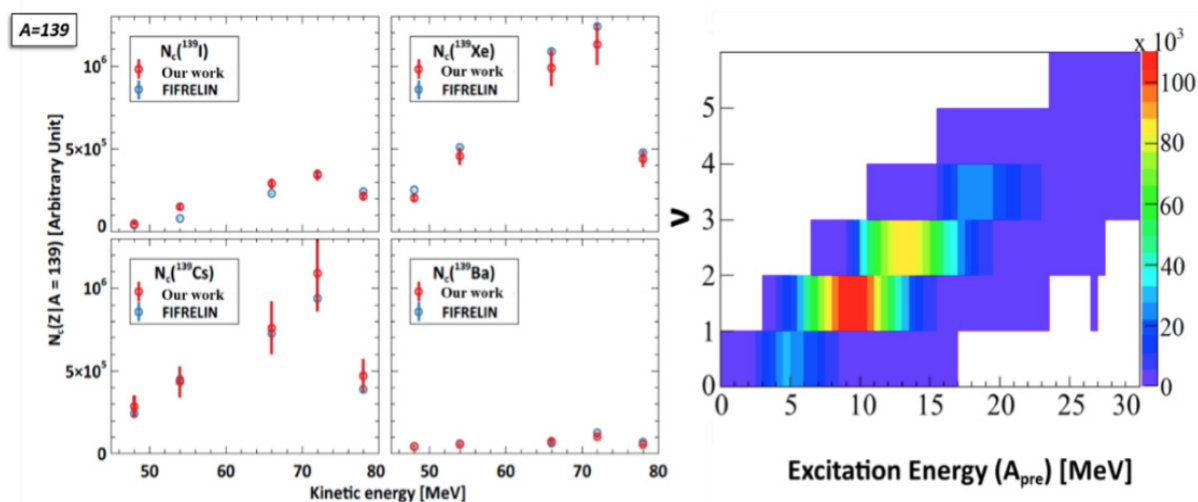


Fig. 1: (left) Kinetic energy dependence of cumulative isotopic yields for the mass 139 and the comparison to the FIFRELIN calculations. (Right) neutron multiplicity as a function of excitation energy deduced from FIFRELIN calculations. (cf Wonder 2018)

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. Néanmoins l'importance des corrections impose de perfectionner le dispositif expérimental en incorporant une mesure de temps de vol pour améliorer la discrimination des événements et limiter les corrections, ce qui représente un objectif de développement à moyen terme.

Les travaux sur les rapports isomériques ont pour premier objectif la construction d'une nouvelle bibliothèque sur une large gamme de temps permettant de déduire les distributions de spin des produits de fission. L'extraction et l'interprétation des isomères nanosecondes (cf. Wonder 2019) ont permis de démontrer la faisabilité du projet. Nous avons donc accès via des mesures directes ou indirectes à l'ensemble de la dynamique en temps de vie des isomères, de quelques 100 ps à plusieurs ms. Ainsi une grande variété d'états peut permettre à la fois de tester les codes (tel que le code FIFRELIN développé au CEA Cadarache ou le code GEF de K-H. Schmidt) et de fournir des informations de première importance afin d'évaluer les observables complémentaires aux rendements de fission comme les spectres de particules promptes.

Ces deux dernières années ont permis de mettre en évidence la faisabilité des mesures d'observables de fission en fonction de l'énergie cinétique des fragments (thèse S. Julien-Laferrière). Par faisabilité on entend la

reproductibilité et la compréhension des phénomènes dans la cible, ainsi que l'acquisition d'une statistique suffisante pendant la durée de vie celle-ci, pour permettre une confrontation aux modèles (voir Fig. 1). La suite de ce projet constitue la thèse de J. Nicholson en collaboration avec le CEA Cadarache.

Le dernier volet de ce programme porte sur le développement de nouvelles évaluations des rendements de fission intégrant l'ensemble des données expérimentales accessibles. Une première méthodologie de travail avec les premiers résultats sur les rendements en masse de $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ avec des matrices de corrélations cohérentes a été présentée (cf B. Voirin et al., EPJ N, 2018, 4, pp.26)

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 gamma - ray Spectrometer) de l'ILL, qui a pour but la réalisation d'un nouveau spectromètre pour étudier les propriétés des particules promptes (n ou gamma). Ce projet correspond au couplage d'un ensemble de détecteurs Ge avec un « filtre de fragments de 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 il a été possible de 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. Le LPSC s'est positionné sur les outils de tracking (Geant 4), les calculs de champs magnétiques et des aberrations pour les corrections des trajectoires et l'instrumentation. Une étude de pré-design de deux types d'aimants (dipôle homogène, dipôle en $1/r$) est en cours de réalisation. Les résultats sont attendus fin 2019.

3.1.3 Physique des réacteurs expérimentale : projets MYRTE et MYRACL

Expériences MYRTE et MYRACL @ GUINEVERE

Dans la continuation du projet FREYA, conclu en 2016, notre équipe a poursuivi ses travaux sur le monitoring de la réactivité d'un réacteur sous-critique, en collaboration avec le LPC Caen, dans le cadre d'un nouveau projet européen, MYRTE, programmé en support aux études de design du réacteur MYRRHA dans le programme cadre EURATOM H2020. Le projet MYRTE est découpé en cinq Working Packages (WP), le 5^{ème} WP étant dédié aux expériences réalisées sur l'installation GUINEVERE dans des configurations de VENUS-F plus représentatives du cœur de MYRRHA. Pour ce faire, le cœur de VENUS-F a été modifié : (i) pour ajouter du bismuth au plomb, afin de représenter l'eutectique Pb-Bi du caloporteur, et de l'oxygène sous forme d'alumine pour adoucir le spectre neutronique et se placer dans des proportions plus proches de celles attendues dans MYRRHA ; (ii) pour intégrer une couronne de graphite simulant la présence de BeO prévue dans MYRRHA et des IPS (In Pile Sections), dispositifs permettant d'accueillir des applications pour irradiation. Ces modifications permettent de reproduire l'hétérogénéité spatiale et le spectre neutronique prévus dans MYRRHA (cf. Fig. 2). Enfin, forts des résultats des projets précédents (FREYA et MUSE), l'instrumentation de VENUS-F a été complétée par trois détecteurs de neutrons rapides, des chambres à fission à seuil à dépôt d'uranium 238. Des chambres à fission standards à dépôt d'uranium 235, néanmoins recouvertes d'une fine couche de nitrure de bore pour absorber les neutrons thermiques, ont également été testées. Les campagnes de mesures effectuées pendant le programme MYRTE ont confirmé l'intérêt de tels détecteurs pour faciliter l'extraction de la réactivité du cœur. Elles ont également démontré la précision des méthodes de mesures absolues de la réactivité testées, suffisamment sensibles pour détecter des modifications fines de la composition du cœur.

Pour compléter les travaux de MYRTE, l'équipe a participé depuis 2017 à une série d'expériences conduites sur l'installation GUINEVERE dans le cadre d'un accord IN2P3 - SCK-CEN. Ce projet, appelé MYRACL, a pour objectif de tester l'applicabilité des méthodes de mesure de réactivité développées pendant les programmes précédents dans des situations plus proches de la réalité d'un ADS de puissance, piloté par un accélérateur Linac (600 MeV, 4 mA). Les efforts se concentrent particulièrement sur le démarrage d'un cœur sous-critique, lorsque la pleine puissance du faisceau n'est pas encore applicable : ce cas est reproduit avec GENEPI-3C en adoptant des réglages lui permettant de produire un faisceau de faible cycle utile, comme le ferait un Linac. Des mesures dans

différentes configurations de détecteurs et sur une large gamme de sous-criticité sont réalisées afin de caractériser la précision des méthodes à l'étude et d'affiner la compréhension de l'impact de la position des détecteurs. Les analyses de ces expériences, faites par le LPC Caen, confirment l'efficacité des méthodes développées, tout en mettant néanmoins en évidence des comportements contre-intuitifs à approfondir dans les réponses des chambres à fission à seuil.

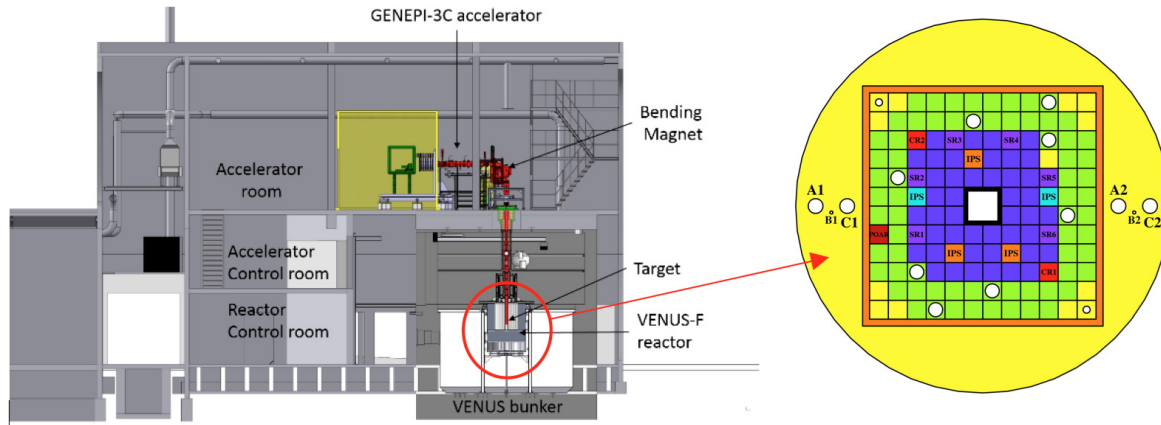


Fig. 2 : (Gauche) installation GUINEVERE au SCK-CEN, constituée du couplage du réacteur VENUS-F avec l'accélérateur de deutons GENEPI-3C ; (droite) configuration SC11 du cœur, utilisée pendant le projet MYRTE. Zonage du cœur : (i) jaune, plomb ; (ii) vert, graphite ; (iii) violet, assemblages combustibles U+Pb+Bi+Al₂O₃ ; (iv) rouge, barres de contrôle (2) + barre dédiée aux expériences de chute de barre (POAR) ; (v) mauve, barres de sûreté (6) ; (vi) bleu et orange, IPS mimant les aires d'irradiation prévues à MYRRHA ; (vii) blanc, trous pour l'instrumentation.

Amélioration de la méthode k-prompt

L'analyse des nombreuses données acquises pendant le projet FREYA se poursuit. Au LPSC, l'essentiel des efforts porte désormais sur l'amélioration de la méthode k-prompt. Comme son nom l'indique, cette méthode permet d'obtenir la valeur du coefficient de multiplication prompt k_p du réacteur (puis sa réactivité) en comparant l'évolution temporelle de la population de neutrons induite par un arrêt programmé du faisceau, enregistrée par les chambres à fission positionnées dans le cœur, à un faisceau de courbes théoriques fonctions du coefficient k_p . Cette méthode est précise et ne nécessite pas de post-correction des résultats. Cependant, elle requiert une puissance de calcul élevée pour générer ces faisceaux de courbes théoriques, ce qui limite son accessibilité. Jusqu'en 2016, l'essentiel de cette puissance de calcul était consommé pour propager les erreurs statistiques des données théoriques et expérimentales. Cette propagation était effectuée avec une méthode Monte-Carlo classique : tirage des paramètres autour de leurs valeurs moyennes dans leurs barres d'erreur respectives, calcul et comparaison des estimateurs théoriques et expérimentaux associés, et enfin extraction de la réactivité. Après une centaine de tirages, on pouvait estimer la valeur moyenne et l'erreur sur la réactivité en traçant son histogramme. Cependant, le calcul des estimateurs à chaque tirage étant long, cette procédure Monte-Carlo était devenue un point faible de la méthode k-prompt. En 2016, une solution analytique à ce problème a été développée, qui a permis une réduction d'un facteur 100 du temps d'analyse des données.

Par ricochet, cette solution a rendu possible une étude qui, malgré son intérêt, avait jusqu'ici été considérée comme non envisageable en raison de son coût prohibitif en calcul : l'évaluation de l'erreur systématique sur la réactivité due aux incertitudes sur la modélisation du réacteur. Comme pour toute analyse, les données expérimentales sont comparées aux prédictions de modèles, modèles qui sont des descriptions inévitablement simplifiées et incomplètes de la réalité. Dans le cas d'un réacteur, les compositions chimiques, densités, sections efficaces d'interaction des matériaux utilisés ne sont pas parfaitement connues. Par ailleurs, un réacteur étant une structure complexe, les modèles recourent à des simplifications de sa géométrie. Ces nombreuses incertitudes et simplifications entraînent des erreurs sur les données théoriques, et donc une erreur sur la réactivité obtenue, qu'il est important de pouvoir estimer, ne serait-ce que pour pouvoir comparer entre eux les résultats obtenus avec des méthodes différentes, ou encore pour pouvoir estimer l'universalité d'une méthode d'analyse, i.e. sa capacité à donner des résultats corrects dans des configurations de réacteur inédites. Ainsi,

dans le cas particulier de la méthode k-prompt, des travaux datant de 2003, effectués par les inventeurs de la méthode, laissaient justement craindre l'existence d'un point faible de la méthode – une dépendance supposée forte d'une distribution théorique clef aux détails de la géométrie du réacteur – susceptible d'entraîner une erreur systématique de quelques pourcents à quelques dizaines de pourcents sur la réactivité. Pour résoudre ce problème de longue date, la méthode k-prompt dite « intégrale », mise au point pour le projet FREYA, a été mise à profit. En bref, cette méthode utilise une procédure de comparaison des données expérimentales et théoriques plus robuste que celle de la méthode classique, secondée par la méthode de propagation analytique des erreurs décrite ci-dessus. La méthodologie de l'étude a été la suivante : (i) génération de 100 modèles du réacteur VENUS-F, en tirant aléatoirement ses paramètres physiques clefs dans leurs barres d'erreurs ; (ii) comparaison des prédictions théoriques obtenues pour chaque modèle aux données expérimentales ; (iii) détermination des 100 valeurs de réactivité associées aux 100 modèles, cf. Fig. 3. Leur histogramme donne alors accès à la barre d'erreur systématique sur la réactivité après déconvolution des erreurs statistiques. Cette étude massive aura nécessité l'automatisation et la réécriture complète des étapes d'analyse. Le résultat obtenu a constitué une surprise : contrairement à l'idée admise, la méthode k-prompt s'est révélée peu sensible aux erreurs de modélisation du réacteur, un bon point pour son universalité.

De 2017 à 2018, l'équipe a par ailleurs commencé le développement d'une nouvelle méthode de mesure de la réactivité, qui s'appuie sur une corrélation simple découverte entre le coefficient k_p et l'intervalle en temps écoulé entre une interruption faisceau et le barycentre des courbes de décroissance temporelles de la population de neutrons prompts. Cette nouvelle méthode de mesure, baptisée flash- k_p , est extrêmement simple et rapide, suffisamment pour permettre une détermination en ligne de la réactivité. Cependant, cette simplicité a un prix : cette méthode n'est pour l'instant applicable qu'à un réacteur instrumenté avec des chambres à fission à seuil.

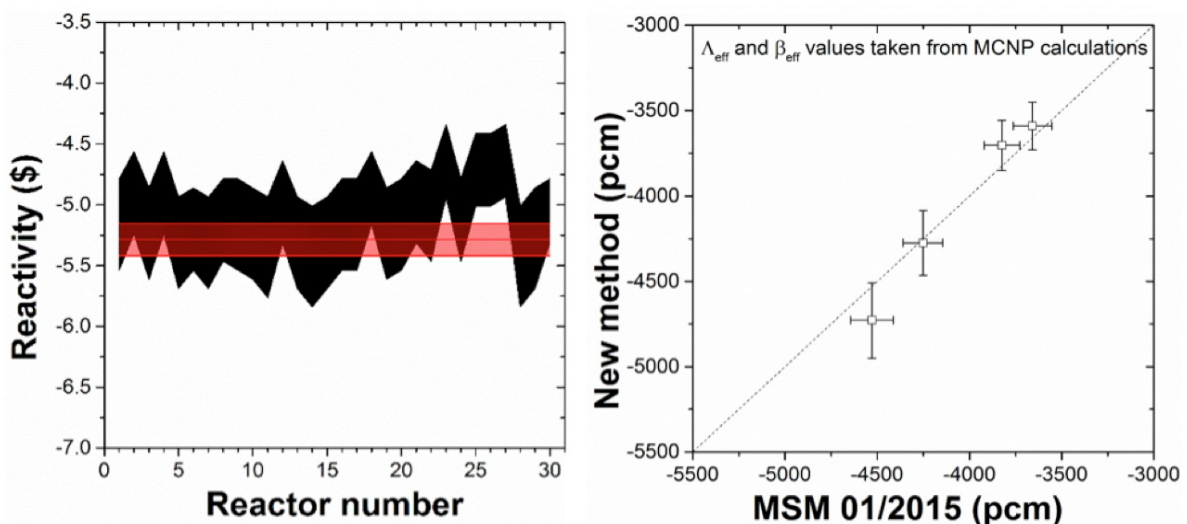


Fig. 3 : (Gauche) réactivités extraites et leurs erreurs statistiques (zone noire) obtenues pour 30 modèles aléatoires du réacteur VENUS-F, comparées à une valeur de référence (zone rouge) ; (droite) réactivités obtenues avec la méthode flash- k_p (axe des ordonnées), comparées aux valeurs MSM de référence (axe des abscisses).

3.1.4 Modélisation, Analyse, Perspectives

Études de conception de SMR (Small Modular Reactors) à eau légère chargés en Thorium

Après la validation de la méthode simplifiée NDM (Nodal Drift Method) de calcul de cœurs en diffusion sur un benchmark de LOCA en CANDU, nous avons d'abord entrepris de développer le code BATH (Basic Approach to Thermal-Hydraulics) de calcul précis de la thermohydraulique. Une fois celui-ci validé, nous l'avons couplé à la NDM dans le but de simuler à l'échelle d'un cœur complet un accident d'éjection de grappes (accident dimensionnant des réacteurs à eau légère). La complexité d'une telle simulation nous a conduit à perfectionner la NDM, puis à valider son couplage avec BATH dans le cadre du benchmark international 2 mini-core 2 . En compétition avec d'autres codes, plus sophistiqués, notre approche académique, simplificatrice, s'est révélée très efficace. Dans l'optique d'appliquer tous ces outils performants à l'étude de petits cœurs (SMR) refroidis à

l'eau légère pour le cycle thorium, l'équipe du LPSC a finalement mis au point une méthodologie complète de conception (cf. Fig. 4).

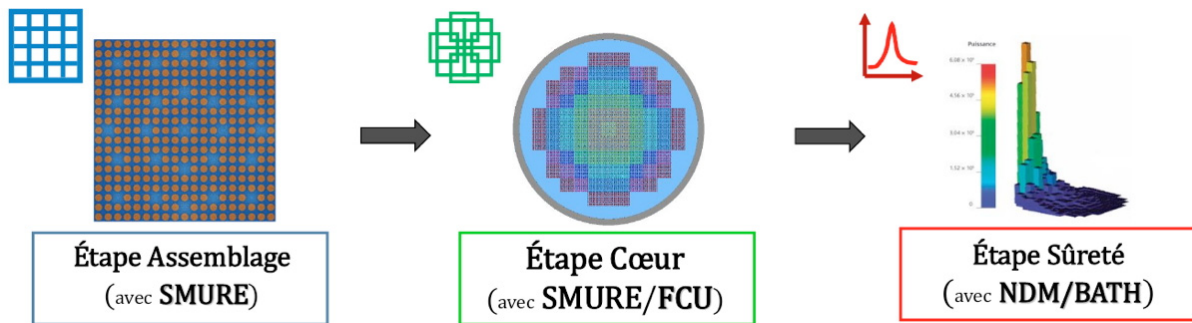


Fig. 4 : Vue d'ensemble de la démarche de conception en trois étapes mise en place, avec ses outils.

Dans la suite logique, au long cours, de tous les travaux menés depuis 2005 sur les réacteurs à eau et haute conversion, l'équipe a appliqué ces nouveaux outils à la conception de petits cœurs (d'une puissance de 600 à 900 MW_{th} max.) utilisant le thorium. De tels cœurs sont du type SMR, dont la compétitivité est accrue par une fabrication possible en série notamment. Dans l'hypothèse probable d'un retard de la future génération de réacteurs et d'une contribution maintenue voire renforcée de l'électronucléaire dans le mix énergétique mondial, l'étude de tels réacteurs combinés au cycle thorium s'est d'autant plus imposée à nous qu'elle nous a permis de simplifier nos tests. Dans son travail de thèse, P. Prévot a ainsi pu optimiser la gestion de la réactivité de tels cœurs par des poisons consommables tout en minimisant le bore soluble et en vérifiant que les critères thermohydrauliques étaient satisfaits (cf. Fig. 4). Selon plusieurs critères (températures maximales, crise d'ébullition), les calculs d'éjection de grappes ont enfin permis une analyse comparative de la sûreté des différents réseaux testés (assemblages de 17x17, 19x19 ou 21x21 crayons), satisfaisante dans tous les cas.

Modèles multi-physiques best estimate pour les futurs réacteurs

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 porte sur l'amélioration des modèles numériques décrivant le comportement thermohydraulique des sels fondus et leur solidification.

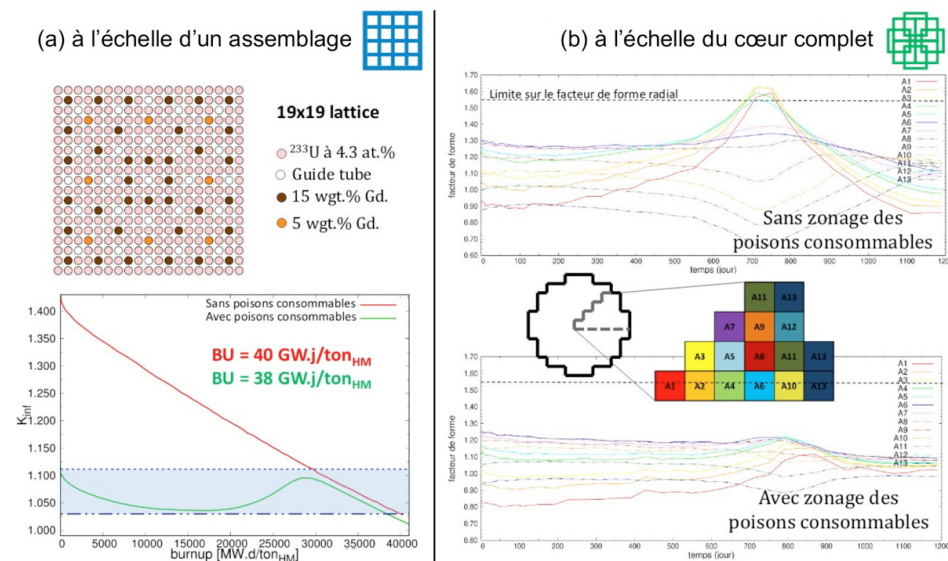


Fig. 5 : Quelques résultats sur l'utilisation de poisons consommables pour la gestion de la réactivité, illustrant la finesse de nos calculs tant à l'échelle assemblage (a) qu'au niveau du cœur complet (b).

Les efforts de modélisation ont été focalisés sur les trois phénomènes clés : la turbulence, le changement de phase et le transfert radiatif et des expériences originales ont été conçues pour tester la validité de ces nouveaux modèles numériques. La Fig. 5 montre le résultat d'une expérience de solidification et ceux produits par le modèle de solidification MASOFOAM (Thèse M. Tano-Retamales 2015-18).

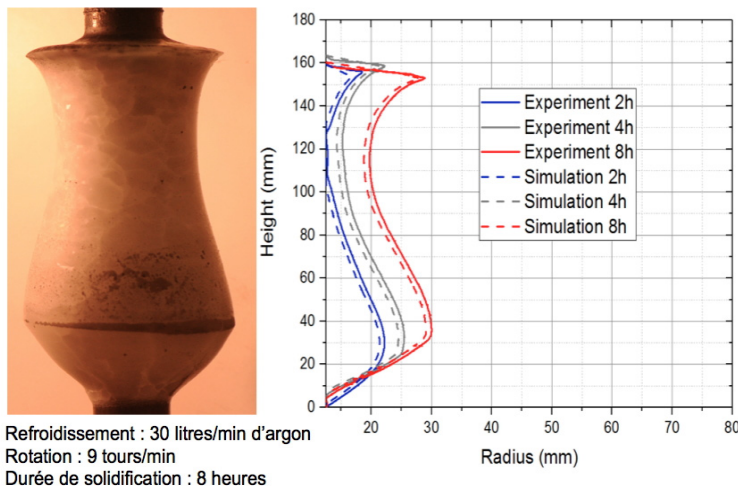


Fig. 6 : Exemple de comparaison entre le résultat d'une expérience de solidification avec rotation (à gauche) et les prédictions du modèle MASOFOAM

Couplages neutronique, thermo-hydraulique et thermomécaniques

La modélisation multiphysique détaillée d'un réacteur nucléaire nécessite la résolution couplée des équations de transport de neutrons, thermo-hydrauliques et thermomécaniques. Le principal défi de ce type de modèle est lié à la prise en compte correcte des interactions complexes entre les divers phénomènes existant dans le réacteur qui ont en général des échelles de temps et des portées dans l'espace très différentes. Tel qu'illustré en Fig. 7, un couplage triple : neutronique, thermo-hydraulique et thermomécanique a été développé pour étudier différents systèmes nucléaires en conditions stationnaires ou transitoires. Ce modèle est utilisé pour étudier les accidents de criticité (Thèse J. Blanco 2017-20) des divers types d'installations nucléaires allant des piscines de combustibles nucléaires irradiés aux réacteurs de recherche, réacteurs à sel fondus ou encore des réacteurs pour la propulsion spatiale.

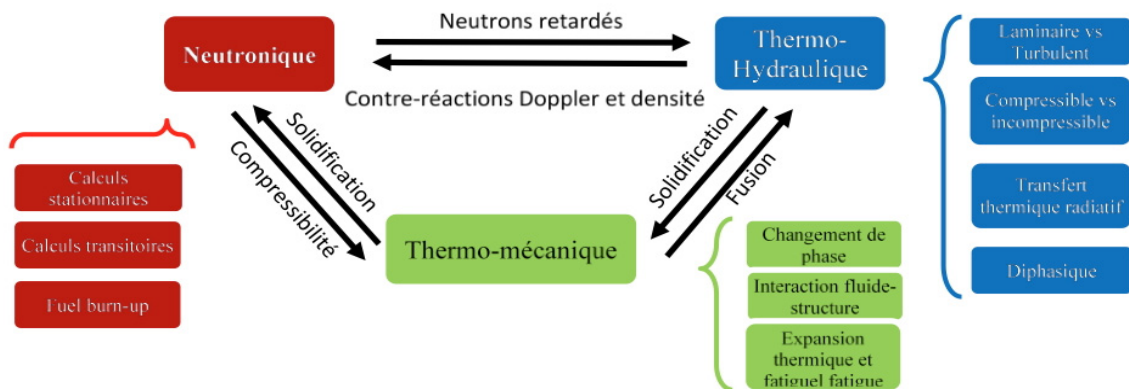


Fig. 7 : Schéma décrivant les couplages apparaissant dans les différents systèmes nucléaires

Modélisation des accidents graves : interaction corium-béton

Un volet récent de nos activités dans la modélisation multiphysique concerne les études de l'interaction qui se produit entre le corium et le béton lors d'un accident grave dans un réacteur nucléaire. Cette action menée dans le cadre d'une collaboration avec EDF (postdoc S. Jamet 2017-18) a abouti au développement d'un modèle numérique simplifié.

Propagation d'incertitudes en physique des réacteurs"

L'équipe participe également au développement d'outils de propagation d'incertitudes dans les modèles multi-physiques, par exemple celles en lien avec les incertitudes de données nucléaires. Elle les applique à différents types de réacteurs, dans le cadre de collaborations avec des exploitants de réacteurs nucléaires comme EDF et l'ILL

Études de scénarios technico-économiques

La place du nucléaire, de telle ou telle filière de réacteur et de telle ou telle gestion de combustible dans le future dépendront de leurs capacités à démontrer de la flexibilité et la robustesse à différentes échelles de temps et probablement de façons très différentes suivant les pays : sortie ou développement du nucléaire. L'équipe travaille sur ces sujets interdisciplinaires à travers différentes collaborations suivant les échelles considérées. D'une part, la question de la flexibilité d'exploitation quotidienne des réacteurs dépend de la pénétration des renouvelables variables et de la réponse des autres moyens de flexibilité (*demand response*, développement des réseaux, stockages, flexibilité des sources pilotables) qui sont pour certaines abordées dans le cadre du projet interdisciplinaire "EcoSesa" de l'IDEX Grenoblois. D'autre part, cette flexibilité se traduit par des incertitudes sur les taux de charges des réacteurs et donc sur leurs coûts, ce qui modifient leurs modèles économiques à long terme. Cette échelle longue est étudiée en collaboration avec les économistes de l'énergie et les physiciens des réacteurs, dans le cadre du projet de Prospective Énergétique du Carnot Énergie du Futur ou par des travaux autour de CLASS, l'outil de simulation de parc nucléaire du CNRS et de l'IRSN.

3.1.5 Pour en savoir plus

Modélisation, analyse, prospectives

- "Enhancements to the Nodal Drift Method for a Rod Ejection Accident in a PWR-like mini-core with lumped thermal model", P. Prévot, A. Nuttin et al., *Annals of Nuclear Energy* 101 (2017) 128-138.
- "Preliminary Design Studies by a Complete Academic Simulation Toolbox of a Water-Cooled Thorium-Fueled Small Modular Reactor Core", P. Prévot, A. Nuttin et al., *Proc. Int. Conf. GLOBAL 2017*.

Modèles multiphysiques

- "Progress in modeling solidification in molten salt coolants", M. Tano-Retamales, P. Rubiolo, O. Doche, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 25.7 (2017).
- "Development and Test of a Cold Plug Valve with Fluoride Salt", J. Giraud, V. Ghetta, P. Rubiolo, M. Tano-Retamales, 12th International Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics, Operation, and Safety (NUTHOS-12), Qingdao City, Shandong Province, China, on October 14-18 (2018).
- "Progress in the Modeling of Molten Corium Concrete Interaction", S. Jamet, J.M. Seiler, P. Rubiolo, B. Tourniaire, 12th International Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics, Operation, and Safety (NUTHOS-12), Qingdao City, Shandong Province, China, on October 14-18 (2018).
- "Convergence Analysis and Criterion for Data Assimilation with Sensitivities from Monte Carlo Neutron Transport Codes", D. Siefman et al., *PHYSOR Conference*, 2018, Cancun, Mexico

Données nucléaires

- "From fission yield measurements to evaluation: status on statistical methodology for the covariance question", B. Voirin, G. Kessedjian, A. Chebboubi, Olivier Serot, S. Julien-Laferrrière et al., *EPJ N - Nuclear Sciences & Technologies*, EDP Sciences, 2018, 4, pp.26
- "A study of the construction of the correlation matrix of $^{241}\text{Pu}(\text{nth},\text{f})$ isobaric fission yields", S. Julien-Laferrrière, A. Chebboubi, G. Kessedjian, Olivier Serot., *EPJ N - Nuclear Sciences & Technologies*, EDP Sciences, 2018, 4, pp.25
- "Fission fragment yield distribution in the heavy-mass region from the $^{239}\text{Pu}(\text{nth},\text{f})$ reaction", Y.K. Gupta, D.C. Biswas, O. Serot, D. Bernard, O. Litaize et al., *Phys.Rev.C*, 2017, 96 (1), pp.014608. 10.1103/PhysRevC.96.014608- "A methodology for performing sensitivity analysis in dynamic fuel cycle simulation studies applied to a PWR fleet simulated with the CLASS tool", Nicolas Thiollière et al., *EPJ Nuclear Sci. Technol.* 4, 13 (2018)

Scénarios

- "The future of technologies for mobility, a model based approach", G. Mantulet, S. Mima and A. Bidaud, 3rd AIEE Energy Symposium Conference Proceedings,

Thèses soutenues durant la période :

- 1- Thibault Chevret, *Mesure de la réactivité de réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur par l'analyse d'expériences d'interruptions de faisceau programmées*, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, 2016.
- 2- Sylvain Julien-Laferrrière, *Approche expérimentale et phénoménologique des rendements de la fission induite par neutron thermique du ^{239}Pu et du ^{241}Pu* , Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes, 5 oct. 2018.
- 3- Pierre Prévot, *Développement d'outils académiques pour la conception et la sûreté de réacteurs innovants, application au dimensionnement de SMR (Small Modular Reactors) refroidis à l'eau légère et chargés en thorium*, Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes, 18 oct. 2018
- 4- Mauricio Tano-Retamales, *Développement des modèles multi-physiques multi-échelle de caloporteurs sels fondus à haute température et validation expérimentale*, Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes, 5 nov. 2018.

Thèses de doctorat en cours :

- 1 - Juan A. Blanco, *Couplage Neutronique-Thermohydraulique-Thermomécanique pour la modélisation des accidents dans des systèmes nucléaires*, (CNRS/IRSN), oct. 2017 - oct. 2020
- 2 - Daniela Reygadas-Tello, *New physics opportunities for fission studies: a new setup at ILL*, (idex UGA/ILL), oct. 2018 - oct. 2021
- 3 - Jehaan Nicholson, *Étude de la dépendance en énergie cinétique des rendements isotopiques et isomériques induits par la fission thermique auprès du spectromètre de masse Lohengrin de l'Institut Laue Langevin*, (CEA), oct. 2018 - oct. 2021
- 4 - Gabin Mantulet, *Étude prospective des synergies et compétition entre technologies de l'énergie et influence sur les marchés*, (Prospen), avr. 2017 - avr. 2020
- 5 - Pamela Lopez, *Méthodes de dimensionnement des incertitudes de la chaîne industrielle de calcul cœur*, (EDF), mai 2018 - mai 2021

3.2 Équipe Molten Salt Fast Reactor MSFR

Équipe de recherche : membres permanents

D. Heuer (CNRS), E. Merle (EC), M. Allibert (Coll. bénévole),

Équipe de recherche : doctorants et postdoctorants

J. Martinet (doctorant), D. Gérardin (doctorant)

Molten salt reactors (MSRs) are a family of liquid-circulating fueled fission reactors using a fluid molten salt mixture as both fuel and coolant. These liquid-fueled reactors exhibit 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 since more than 10 years ago uses a fast neutron 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. It is also at the center of the SAMOFAR European project where the team contributes to the development of dedicated safety methodologies and their application to the MSFR risk analysis, coupled to the definition of the design and operation modes of such a reactor. Finally, the team works on some new applications and designs of MSR as Small Modular Reactors, in collaboration with industrial partners.

3.2.1 Introduction : le concept de Molten Salt Fast Reactor MSFR

Depuis plus de 15 ans, l'équipe MSFR du LPSC étudie un concept innovant de réacteur nucléaire nommé réacteur à sels fondus (ou MSR pour Molten Salt Reactor en anglais), axé sur la sûreté intrinsèque et la réduction des déchets radioactifs. Ce réacteur est basé sur un combustible liquide circulant entre le cœur et les échangeurs de chaleur, ce liquide remplissant à la fois le rôle de combustible et de caloporteur. Les études pilotées par le LPSC et menées jusqu'à présent au niveau local, national et international (projet européen SAMOFAR en cours, Forum International Génération 4, AIEA), ont majoritairement porté sur un réacteur de puissance élevée (3 GWth) fonctionnant en cycle du combustible Thorium, visant à définir les configurations d'un tel réacteur d'intérêt. Les réacteurs à sels fondus (RSF) sont un des six candidats retenus par le forum international Génération IV en tant que concepts prometteurs pour les réacteurs nucléaires du futur.

3.2.2 Proposition d'un design intégré du MSFR

Dans le cadre du projet SAMOFAR l'équipe a proposé un design intégré du MSFR qui a pour but principal d'éliminer le risque de fuite du sel combustible. Ce design a fait l'objet du livrable 1.1 de SAMOFAR et sert de référence pour toutes les études de sûreté réalisées dans ce projet.

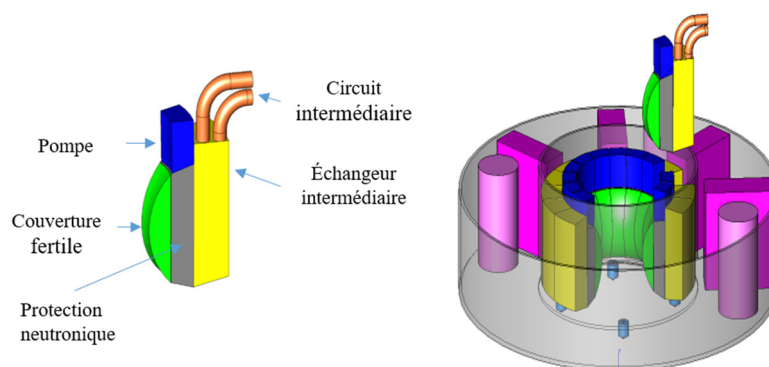


Figure 1: Design intégré du MSFR. À gauche un secteur de refroidissement et à droite la disposition générale des secteurs dans la cuve réacteur. Les blocs roses autour de la cuve réacteur sont des réservoirs de stockage du sel.

La Figure 1 représente l'idée générale de ce design intégré. Le sel combustible est entièrement contenu à l'intérieur d'une cuve dans laquelle des secteurs de refroidissement sont insérés. Ces secteurs de refroidissement comprennent la couverture fertile, une pompe pour forcer la circulation du combustible, un échangeur de chaleur refroidi par le sel intermédiaire et une protection neutronique entre la couverture fertile et l'échangeur. Les

secteurs de refroidissement sont disposés à la périphérie de la cuve de manière à ne laisser dans le centre de la cuve que du sel combustible correspondant au cœur du réacteur où ont lieu les fissions.

Simulateurs pour des études de design et de pilotage

Deux types de simulateurs du MSFR sont en cours de développement dans l'équipe. L'un est statique et a pour but de rechercher les configurations les plus optimales du design en fonction de critères préétablis. L'autre, dit dynamique, a pour but de permettre une simulation en temps réel et des études de pilotage du réacteur en situation normale et incidentelle.

Code système statique

Le code statique permet de déclarer des paramètres décrivant le réacteur et les méthodes de calcul associées. Les paramètres dont le calcul n'est pas possible directement sont dits libres et doivent être fixés arbitrairement. Par ailleurs des contraintes sont déclarées indiquant des valeurs cibles pour certains paramètres et une tolérance autour de ces valeurs cibles. Un algorithme génétique recherche enfin le jeu de valeurs des paramètres libres réalisant au mieux les contraintes fixées.

Ce code peut être utilisé, par exemple, pour configurer les échangeurs de chaleur en intégrant la géométrie complète du réacteur et en recherchant le meilleur mode de fonctionnement possible. Les contraintes, dans ce cas, sont des vitesses limites de circulation des fluides, des températures critiques à ne pas dépasser et des pertes de charge maximum.

Code système dynamique

Ce code système dynamique, correspondant à un simulateur de fonctionnement du réacteur, est en cours de développement. Le circuit combustible y est modélisé par le code LiCore développé par A. Laureau durant sa thèse, code basé sur un modèle de cinétique point amélioré afin de prendre en compte la circulation du combustible hors cœur. Un premier modèle simplifié des circuits intermédiaire et de conversion de l'énergie sont implémentés dans le code LiCore, qui permet de calculer le comportement du réacteur en temps réel. Des collaborations sont en cours pour compléter et améliorer cette modélisation des circuits intermédiaire et de conversion, d'une part avec l'entreprise CORYS, leader européen du développement de simulateurs de centrales nucléaires, d'autre part avec Politecnico di Milano dans le cadre du projet européen SAMOFAR.

Approche de sûreté et analyse de risques

Comme tout réacteur nucléaire de quatrième génération, le MSFR doit répondre à différentes contraintes dont une sûreté optimale. La sûreté du MSFR est étudiée dès les premiers stades de conception du réacteur afin d'être intégrée au design lors de sa définition plutôt qu'ajoutée a posteriori. En raison de ses spécificités, en particulier l'état liquide du combustible, et du stade préliminaire de son design, l'analyse de sûreté du MSFR a nécessité la mise au point de méthodologies d'analyse de sûreté adaptées et technologiquement neutres, travail piloté par l'IRSN et réalisé au sein du projet européen SAMOFAR et dans la thèse de D. Gérardin effectuée au LPSC et soutenue fin 2018.

Une première application de cette méthodologie a été également réalisée, afin d'identifier les événements initiateurs d'accident, qui sont les points de départ des séquences accidentelles. Pour cela, les méthodes d'analyses de risques du Master Logic Diagram (MLD) et d'analyse fonctionnelle ont été utilisées, en collaboration avec Framatome et Politecnico di Torino. Les familles d'événements initiateurs identifiées pour le MSFR sont les suivantes :

- Insertion de réactivité
- Augmentation de l'extraction de chaleur/Sur-refroidissement
- Perte de débit combustible
- Diminution de l'extraction de chaleur
- Perte d'étanchéité du circuit combustible
- Perte du contrôle de la composition/chimie du sel combustible

- Surchauffe des structures du circuit combustible
- Perte du refroidissement des autres systèmes contenant des matières radioactives
- Perte du confinement des matières radioactives dans d'autres systèmes
- Dégradation mécanique du circuit combustible
- Perte du contrôle de la pression dans le circuit combustible
- Fuite du circuit de conversion
- Perte de l'alimentation électrique.

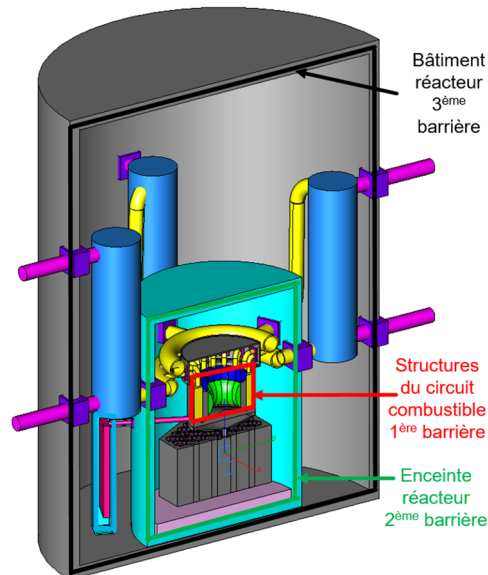


Figure 2 : Proposition de barrières de confinement de la radioactivité pour le réacteur MSFR

Puis, une évaluation préliminaire de la fréquence d'occurrence et des conséquences de ces événements a été menée afin de sélectionner une liste resserrée d'événements les plus pertinents qui devra être étudiée dans la suite de l'analyse de sûreté. Cette évaluation de la gravité des événements initiateurs vise à définir si des dispositions de prévention doivent être implémentées pour proposer des dispositifs de mitigation adaptés.

Enfin, une première ébauche de l'architecture de sûreté du réacteur a été proposée. Elle est obtenue en appliquant la notion de défense en profondeur au MSFR. Celle-ci prévoit l'implémentation d'une série de mesures incluant des barrières de confinement physiques et robustes et des systèmes de sûreté divers et redondants. Dans cette optique, plusieurs propositions sont faites pour définir les barrières de confinement du MSFR (voir Figure 2). Ensuite, la méthode des Lignes De Défense (LDD) est employée pour définir des dispositions de sûreté adaptées aux différentes familles d'événements initiateurs et vérifier la concordance de l'architecture de sûreté proposée avec le concept de défense en profondeur. Un des résultats de l'analyse de risque réalisée est effectué actuellement et a pour objectif d'améliorer le design du réacteur proposé en début d'analyse de risque. Des propositions d'améliorations sont en cours d'identification : l'ajout de composants est proposé, des designs alternatifs sont présentés et les manques de connaissances sur certains phénomènes ou procédures sont soulignés afin de guider les études futures.

3.2.3 Réacteur à sels fondus et Small Modular Reactor

L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production électrique, en particulier dans les pays de l'OCDE, et le manque actuel de perspective pour un stockage économique de l'énergie, nécessitent le maintien de sources de production de base ayant une grande flexibilité de production. Le nucléaire étant la principale source de production de base non carbonée, les réacteurs de quatrième génération devront être capables de modifier rapidement leur puissance afin de venir compléter la production des sources intermittentes telles que l'éolien et le photovoltaïque. Ceci crée de nouvelles problématiques et ainsi de nouvelles thématiques de recherche. Il est ainsi nécessaire d'imaginer et de développer des systèmes nucléaires innovants permettant

de contribuer à ce nouveau mix énergétique tout en étant acceptables du point de vue de la sûreté, des déchets et du coût. Pour cela des concepts de réacteurs modulaires de faible puissance (les Small Modular Reactors - SMRs) sont envisagés. Dans ce contexte, Framatome a identifié le concept de MSFR comme très prometteur et a souhaité s'impliquer avec le CNRS au travers de la thèse de J. Martinet cofinancée Framatome/Initiatives de Recherche Stratégiques (IRS) de l'IDEX de l'Université Grenoble Alpes. Ces travaux de thèse portent sur des études visant à définir un réacteur MSFR de plus faible puissance (quelques centaines MW_{él}) et utilisant le cycle du combustible U/Pu plus rapidement accessible, concept dit S-MSFR pour Small-MSFR.

3.2.4 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

M. Allibert, S. Beils, S. Bourg, M. Brovchenko, G. Campioni, B. Carlucci, P. Chamelot, M. Delpech, S. Delpech, P. Gauthé, D. Gerardin, A. Gerschenfeld, Y. Gorsse, J. Guidez, D. Heuer, E. Ivanov, A. Laureau, D. Lecarpentier, J. Martinet, E. Merle, J. Serpe, "Rapport Scientifique des Journées RSF des 22-23 mars 2018", Massy (2018) - http://irfu.cea.fr/Meetings/seminaires-MSR/MSR_Rapport_final.pdf

D. Heuer, A. Laureau, E. Merle-Lucotte, M. Allibert, D. Gerardin, "A starting procedure for the MSFR: approach to criticality and incident analysis", Actes de la conférence internationale ICAPP'2017, Kyoto, Japon (2017) - http://lpsc.in2p3.fr/images/ActivitesScientifiques/Physique_des_Reacteurs/PDF/ICAPP2017_MSFRstartingProcedure.pdf

Thèses soutenues durant la période :

Delphine Gérardin, "Développement d'outils numériques et réalisation d'études pour le pilotage et la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR", Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France (2018) - http://lpsc.in2p3.fr/images/ActivitesScientifiques/Physique_des_Reacteurs/PDF/manuscritTheseGerardinD-final.pdf

Journées Scientifiques de Massy sur les réacteurs à sels fondus RSF 2018 : <http://irfu.cea.fr/Meetings/seminaires-MSR>

3.3 Équipe Physique Nucléaire et Applications Médicales

Équipe de recherche : membres permanents

Y. Arnoud, D. Dauvergne, O. Rossetto, M.L. Gallin-Martel, S. Marcatily

Équipe de recherche : doctorants et postdoctorants

R. Delorme, J. Livingstone, L. Léau-Mercier (postdoctorants), R. Fabbro, I. Fonteille, N. Rosuel (doctorants)

Personnels des services techniques

G. Bosson, J.L. Bouly, J. Bouvier, B. Boyer, L. Gallin-Martel, F. Rarbi, M. Yamouni (*Service Électronique*)

M. Marton, J.F. Muraz (*Service Détecteurs et Instrumentation*)

J. Odier (*Service Informatique*)

3.3.1 Introduction

Les projets de l'équipe Physique Nucléaire pour les Applications Médicales 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 à vérifier la qualité de leur délivrance. La réponse qu'ils tentent 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 -Radiothérapie Conformationnelle par Modulation d'Intensité- ou en radiothérapie synchrotron), soit par une radio-sensibilisation au moyen de molécules ou de nanoparticules vectorisées. Toutes ces activités ont en commun de s'inscrire dans un contexte collaboratif local, avec des partenaires cliniques tels que le CHU de Grenoble, en s'appuyant sur les infrastructures expérimentales telles que l'institut Néel, 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, ces activités sont fédérées au sein du GDR MI2B.

L'équipe de recherche a fortement évolué au cours des dernières années : arrivée de D. Dauvergne en 2015 qui a pris la direction d'équipe, et a initié le projet d'applications médicales des détecteurs diamants (l'équipe devenant Physique pour les Applications Médicales) ; départ de R. Delorme en 2017 (recrutement sur un poste permanent CR), ce qui a momentanément interrompu les activités de simulation pour la radiobiologie ; fusion avec l'équipe de Structure Nucléaire du laboratoire en 2018, l'équipe devenant Physique Nucléaire et Applications Médicales, puis départ au cours de la même année de deux chercheurs sur les trois - démission du CNRS de G. Simpson, M. Ramdhane rejoignant l'équipe Physique des Réacteurs). Enfin, l'équipe a reçu un soutien fort du service détecteur et instrumentation avec le concours régulier au sein de l'équipe de recherche de S. Marcatili en tant qu'IR en instrumentation fin 2018, dans un projet de recherche et développement axé sur notre équipe.

3.3.2 Monitoring de faisceaux de photons : le projet TraDeRa

Collaborations : CHU-Grenoble, ESRF

L'équipe de *physique nucléaire pour les applications médicales* a développé un système autonome de contrôle en ligne de la qualité des faisceaux de rayons X utilisés pour le traitement des tumeurs en radiothérapie externe. Ce système TraDeRa (Transparent Detector for Radiotherapy), placé en amont du patient, fournit des données spatiales et temporelles sur la conformité du faisceau qui le traverse tout au long de l'irradiation. La preuve de principe a été apportée par sa capacité à détecter en ligne des défauts d'irradiations, dont les conséquences en termes de dose délivrée au patient peuvent avoir un impact notable sur la qualité du traitement.

La conversion en dose, grandeur physique, des données recueillies par le système TraDeRa nécessite de connaître très précisément les paramètres du faisceau de rayons X qui traverse le détecteur. Ces paramètres peuvent être résumés à deux contributions majeures : l'énergie moyenne et le diamètre de la tache focale du faisceau d'électrons qui impacte la cible de production de rayonnement de freinage, source des rayons X. Or à l'hôpital, c'est par un long processus de mesures indirectes que ces paramètres sont obtenus - en particulier par des mesures tridimensionnelles dans une cuve à eau parcourue par une chambre d'ionisation motorisée, qui conduisent à des courbes de rendement en profondeur et à des profils de doses. Ces données mesurées par l'équipe médicale sont entrées dans un programme commercial, qui calcule en interne les caractéristiques du

faisceau. Les temps de calcul peuvent être élevés, parfois plusieurs jours. En général, les caractéristiques du faisceau restent cachées à l'utilisateur final, qui utilise ensuite de façon pragmatique le programme commercial pour la planification des irradiations des patients. Ainsi, les données nécessaires à TraDeRa pour la conversion en dose restent noyées dans un circuit opaque.

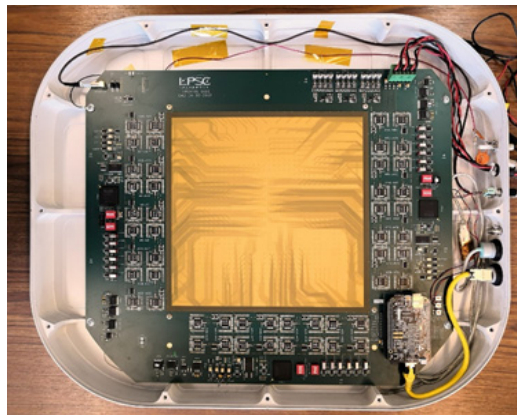


Figure 1: Le détecteur TraDeRa de 1600 voies

Le travail de thèse de Robin Fabbro a porté sur l'utilisation des données accessibles, les relevés de cuve à eau, pour estimer en quelques minutes les caractéristiques des faisceaux d'une machine donnée. De nombreuses simulations de dépôt dosimétrique ont été effectuées, et c'est par le biais d'un algorithme original que le faisceau est modélisé. La validité de la méthode a été testée sur des dépôts de dose simulés, où les caractéristiques des faisceaux étaient connues. L'utilisation de la méthode en aveugle a permis de déterminer l'énergie du faisceau de 6 MeV à mieux que 0,003 MeV. Le détecteur associé à l'algorithme de caractérisation des faisceaux permet ainsi non seulement de contrôler la conformité des faisceaux délivrés pour les traitements des cancers, mais aussi d'estimer rapidement la dose délivrée.

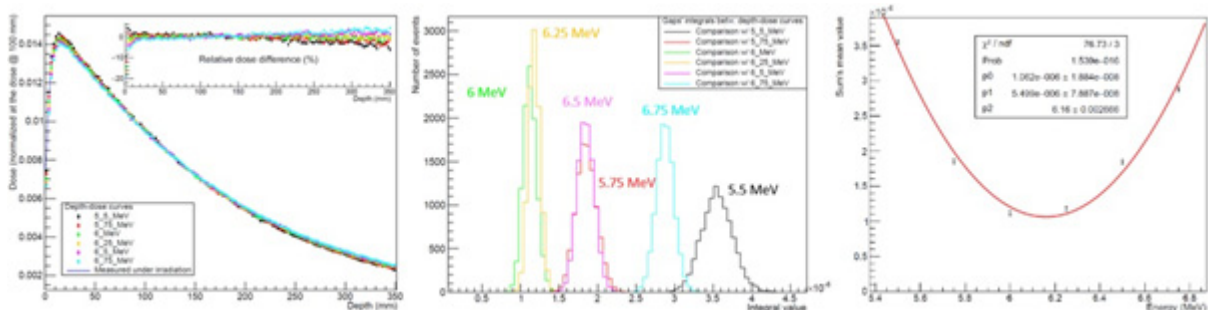


Figure 2 : Illustration de la méthode de détermination de l'énergie moyenne du faisceau d'électrons d'un linac. La figure de gauche montre les différents rendements en profondeur simulés dans une cuve à eau placée sous le faisceau, en faisant varier l'énergie du faisceau par pas de 250 keV. Chacune des courbes présente une forme légèrement différente du rendement expérimental, dont on cherche à déterminer l'énergie. L'algorithme original somme ces différences de rendement en profondeur et après normalisation, fournit une valeur numérique, appelée facteur de compatibilité, d'autant plus proche de zéro que la courbe simulée s'approche de la courbe expérimentale. Les incertitudes sur les rendements simulés, inhérentes au nombre fini d'événements utilisés, sont prises en compte et conduisent à un ensemble de facteurs de compatibilité, dont on représente la distribution. La figure du milieu représente ces distributions. Enfin, la valeur centrale de chacune des distributions de facteurs de compatibilité est représentée sur le graphe de droite, en fonction de l'énergie. Le comportement global est décrit par une parabole, dont le minimum est l'estimateur de l'énergie du faisceau à déterminer.

D'excellents résultats avaient été obtenus sur la version prototype du détecteur TraDeRa sous faisceaux en terme de stabilité des systèmes d'acquisition et de l'électronique associée, de dynamique d'acquisition, d'atténuation faible et homogène et de sensibilité à la détection d'erreur avec le détecteur fixé sur la tête de l'accélérateur. Le système donne une mesure de fluence par rapport à une référence, l'objectif final étant de pouvoir obtenir une réponse en dose du détecteur. Ceci nécessite cependant de pouvoir réaliser un étalonnage absolu de tous

les pixels du détecteur. Cela peut se faire d'une part une simulation de la réponse du détecteur par Monte Carlo pour la validation des et l'étalonnage des mesures, et d'autre part le montage d'un système d'étalonnage de chaque pixel du détecteur par une source radioactive fixée sur un système de balayage pas à pas permettant d'assurer une irradiation identique de tous les pixels. Trois séries de mesures ont été réalisées en 2016 au CHU de Grenoble pour tester et réaliser cette calibration du prototype ce qui a permis d'appréhender la poursuite des mesures sur la version optimisée du détecteur avec 1600 voies de lectures. Les performances de détection et d'électronique du détecteur ont été présentées et publiées dans la conférence IEEE (Gallin-Martel et al. 2016, NSS/MIC/RTSD), 2016, pp. 1-5).

Valorisation : Le projet HiDoRa

Le système TraDeRa a été lauréat d'un financement de maturation, à partir de février 2017 et pour une durée de 16 mois, par la Société d'Accélération de Transfert de Technologie de Grenoble (SATT Linksum). Étude de marché, recherche de débouchés applicatifs, adéquation du développement aux attentes des praticiens hospitaliers; le projet a pris une autre dimension ciblée sur la valorisation, conformément aux recommandations du conseil scientifique.

La conclusion de cette étude qui a couru sur un an a mis fin à cette recherche de débouché spécifique. D'une part, à cause de l'absence d'impératif réglementaire pour inclure des dispositifs de mesures indépendants pendant la durée intégrale des traitements, en Europe et aux États-Unis. Et d'autre part, au vu de la complexité de la mise en œuvre de la norme des dispositifs médicaux, le détecteur TraDeRa n'étant pas portable en l'état vers des applications directes pour le milieu hospitalier.

L'étude a cependant permis de cibler deux applications voisines, l'une à visée médicale et l'autre à visée métrologique, où les compétences acquises pour le développement du système TraDeRa sont porteuses en termes de R&D scientifique et de débouchés valorisables. L'application médicale, dans la lignée du développement précédent, concerne le contrôle des faisceaux à très haut débit de dose qui inclut la technique dite d'irradiation « flash », en collaboration avec un industriel Français désireux de s'impliquer dans la radiothérapie de pointe. Dans cette nouvelle évolution de la radiothérapie, la dose prescrite est délivrée plus rapidement par des faisceaux dont l'intensité crête est jusqu'à 1000 fois plus élevée que les standards actuels. Ceci permet un meilleur contrôle tumoral avec une réduction de l'impact sur les tissus sains pour certains types de cancers.

La mesure des caractéristiques des faisceaux de très haute intensité est un défi physique: les systèmes de mesures habituels qui reposent sur le principe des chambres d'ionisation à air présentent une saturation à haute intensité, à cause de la recombinaison d'une partie des ions créés en quantité très élevée dans le volume sensible de détection. Il s'agit de contourner cette limite physique, en proposant un système composite capable de gérer les très hauts flux en fournissant une réponse rapide de l'intensité et de la distribution spatiale du faisceau pulsé, qui peut atteindre une puissance crête de 1 MW.

Ce système composite comprend un capteur, un système de collecte des charges générées dans le capteur, ainsi qu'un module de pilotage. L'ensemble doit fournir une réponse linéaire sur toute la gamme de mesure, avec une précision meilleure qu'1%, à raison de 250 mesures par seconde. Qui plus est, le résultat de la mesure des caractéristiques de chaque impulsion du faisceau de traitement doit être fourni en moins d'une milliseconde.

Le capteur doit être le plus transparent possible au faisceau qui le traverse. Ceci afin de limiter la puissance déposée, et de réduire d'autant les contraintes thermiques. Les éléments d'un premier prototype reposant sur des technologies éprouvées ont été conçus et sont en cours d'assemblage. Ce prototype a été développé afin de valider le comportement de l'électronique de collecte des charges et la linéarité de la réponse à bas débit de dose. Au-delà, on s'attend naturellement à des phénomènes de recombinaison, induisant une saturation des charges collectées.

Une étude sur les propriétés des matériaux a été menée afin de concevoir le capteur à électrodes de nouvelle génération, qui ne présentera pas de saturation, avec un focus sur le transfert de chaleur nécessaire à la pérennité du système et sur la transparence du dispositif au faisceau qui le traverse. Il conviendra de mettre en œuvre des éléments à la fois isolants électriquement et conducteurs de chaleur, des propriétés qui sont antagonistes dans les matériaux usuels.

Le système de collecte des charges, développé par le service électronique du laboratoire, a pour contrainte de gérer une gamme dynamique allant de 1 à 1 million, ceci afin d'être aussi bien compatible avec les générateurs de faisceaux de rayons X d'ancienne génération que les nouveaux faisceaux à haut débit, utilisant des X ou des électrons. Il sera utilisé en parallèle des ASICs précédemment développés pour le système TraDeRa, qui ont prouvé leur fiabilité dans la mesure des charges en environnement électromagnétique contraignant. La puissance électrique élevée consommée par le système de production du faisceau de radiothérapie produit un rayonnement parasite large bande véhiculé entre autres par le secteur et dont le rayonnement se superpose aux charges collectées dans le capteur. Un travail minutieux a permis d'éliminer cette composante multi gammes du système de collecte de charges.

Enfin le pilotage de l'ensemble repose sur une carte originale développée par le service électronique : la "generic board". Elle comprend à la fois un FPGA pour le traitement en temps réel des signaux d'acquisition et de synchronisation, un module de stockage, et un microprocesseur pour la souplesse de gestion des périphériques à l'aide d'un code embarqué, facilement modifiable. Une étude parallèle a été menée avec un système à base de STM32 pour évaluer les performances d'acquisition, dans le domaine du temps réel.

À terme, le système de mesure des hauts débits de dose, HiDoRa (High Dose Rate), devrait permettre le suivi en ligne des faisceaux de rayonnements ionisants de très haute intensité, qu'ils soient à base de photons X ou encore d'électrons.

3.3.3 Monitoring en ligne de l'hadronthérapie, applications des détecteurs diamant rapides

Contributeurs hors équipe :

A. Bes, J. Collot, J.Y. Hostachy, A. Lacoste, O. Rossetto
S. Curtoni, A. Ghimouz

Collaborations :

IPN-Lyon, CREATIS-Lyon, CPPM-Marseille, RSRM-Grenoble, CAL-Nice, ARRONAX-Nantes, ILL, ESRF, IFJ PAN Krakow, INFN-Milan, CERN-RD42, LSPM-Villetaneuse, IPHC-Strasbourg.

Introduction

Un enjeu majeur pour l'amélioration de la qualité des traitements en hadronthérapie est le contrôle en ligne de l'irradiation, et en particulier la mesure in vivo du parcours des ions, spot par spot, afin de détecter toute déviation par rapport au plan de traitement, et ce à l'échelle millimétrique. Les acteurs de l'actuelle collaboration CLaRyS (IPNL, CREATIS, CPPM, LPSC) se sont lancés depuis une dizaine d'année sur la mesure des rayonnements secondaires issus de la fragmentation nucléaire, et plus spécifiquement des rayonnements gamma prompts. L'apport original du LPSC dans la collaboration CLaRyS est l'amélioration du temps de vol pour la détection des rayonnements secondaires, avec une résolution temporelle accrue. En effet, une mesure avec une résolution sur le temps de vol de 1 à 3 ns permet de discriminer entre les photons gamma issus du patient, et les neutrons ou gammas diffusés, en plaçant les détecteurs à une distance suffisante (supérieure à 50 cm typiquement). Si cette résolution descend à 100 ps, alors, non seulement la distance de détection peut être réduite, mais en plus le temps de vol permet d'obtenir une certaine précision spatiale, à l'échelle centimétrique, sur le vertex d'émission gamma. Nous travaillons à la fois sur la résolution temporelle de l'hodoscope faisceau, en développant des détecteurs diamant de grande surface (projet MoniDiam), et sur celle de la détection gamma, dans le cadre du projet CLaRyS-UFT. En parallèle, nous testons ces détecteurs diamant pour des applications en physique nucléaire (ILL-Lohengrin) ou de haute énergie (projet MonoDiam-HE). L'ensemble de ces activités autour des détecteurs diamant a été présenté à la collaboration RD42 du CERN, à laquelle nous émergeons.

Le projet et la collaboration CLaRyS

Le LPSC contribue au développement de caméras gamma de la collaboration, pour la détection gamma prompts avec temps de vol. Ce développement, coordonné par l'IPNL, consiste en une caméra Compton avec un diffuseur constitué de détecteurs silicium à pistes double face, et un absorbeur en blocs BGO lus par des quartets de tubes photomultiplicateurs. Une caméra multi-collimatée reprend le même absorbeur, avec un collimateur monodimensionnel constitué de plaques d'alliage de tungstène. Un hodoscope à fibres scintillantes croisées

permet l'étiquetage spatial et temporel du faisceau incident. L'acquisition des données à haut débit (plus de 1500 canaux de lecture) est gérée par un système micro-TCA (carte AMC40 dérivée d'un développement pour LHC-b). Nous participons aux tests des composants de la caméra (Centre Antoine Lacassagne à Nice), ainsi qu'aux travaux de simulations associés aux performances attendues en conditions cliniques de traitements, et pour une application innovante en imagerie médicale de la caméra Compton. Par ailleurs, une solution originale pour le contrôle du traitement par comptage gamma-prompt intégral (PGPI pour Prompt Gamma Peak Integral), c'est-à-dire sans collimation, a été proposée par la collaboration et a conduit à un dépôt de brevet. Un important article de revue sur l'utilisation des rayonnements gamma-prompt pour le contrôle de l'hadronthérapie a été publié début 2018. Enfin, d'un point de vue technique, nous contribuons au développement d'un convertisseur temps numérique (TDC) programmable sur FPGA pour l'ensemble des détecteurs de CLaRyS.

Développement d'un hodoscope faisceau pour étiquetage spatia et temporel

Les détecteurs diamant CVD (Chemical Vapor Deposition), mono- ou poly-cristallins, présentent un certain nombre d'atouts pour répondre à la problématique de détection 2D de particules chargées à haute résolution temporelle, ou de dosimétrie de rayonnements ionisants : 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. Ils sont radiorésistants, c'est-à-dire qu'ils pourront être soumis à des irradiations prolongées. Enfin leur numéro atomique faible, similaire à celui des tissus vivants, en fait un matériau tissu-équivalent. Cependant, seuls les diamants polycristallins, ou des monocristaux hétéroépitaxiaux, sont disponibles avec de grandes surfaces nécessaires à l'application hodoscope faisceau.

Au sein du laboratoire, la collaboration entre les chercheurs du projet ANR Monodiam-HE (2012-2016) et du projet Monodiam, débuté en 2015, et la mise en commun de leurs ressources, ont permis de disposer de bancs de tests des détecteurs pour les mesures de courant de fuite, et les mesures de réponses impulsionnelles avec source bêta (électrons rapides traversants) et source alpha (dépôt d'énergie localisé au voisinage de la surface, ce qui permet de différencier les signaux induits par les courants d'électrons et de trous). Le traitement des surfaces en utilisant la technologie DMW (Distributed Microwave Plasmas), une technologie originale et polyvalente développée par le groupe Plasma. Une telle technologie permet un traitement à très faible pression avec l'aide d'ions (nettoyage, pulvérisation assistée par plasma) ainsi que le traitement à haute pression (par exemple traitement par plasma réactif). Grâce au soutien des services Électronique et Instrumentation, nous avons pu assembler des détecteurs à simple métallisation (disque aluminium sur chaque face) montés sur supports adaptés en impédance, et des détecteurs de 1 cm² à pistes double-face, montés sur support avec préamplis de courant discrets réalisés au LPSC. La métallisation par lithographie et le bonding des pistes ont été réalisés en collaboration avec l'Institut NÉEL (plateforme Nanofab). La figure 3 présente une photographie des deux types de détecteurs.

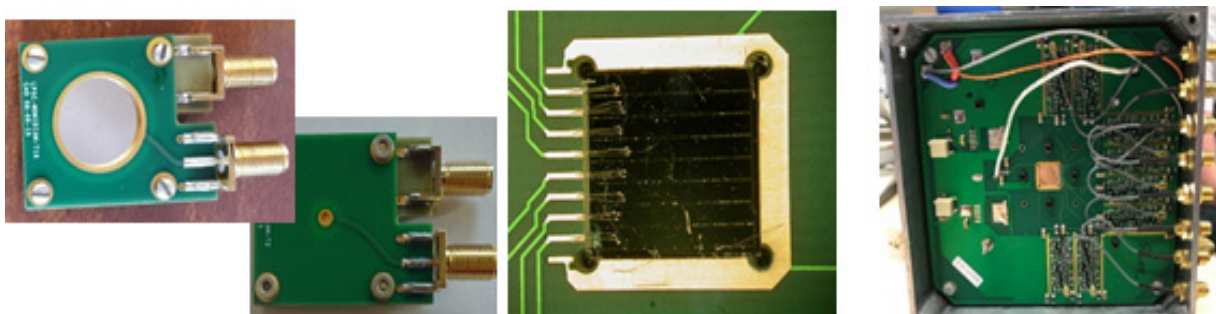


Figure 3 : Gauche montage de détecteurs 2x2 cm² et 5x5 mm² avec métallisation simple. Droite : détecteur de 1 cm² avec pistes double face, détail et vue d'ensemble avec préamplificateurs de courant monté sur PCB.

Plusieurs expériences de caractérisation des performances de divers types de détecteurs ont été réalisées :

- Au laboratoire, sur les bancs de tests : mesures de courants de fuite, mesure de la distance de collection de charge (CCD) et analyse de formes d'impulsions,

- A l'ESRF (expériences MI1243 et MI1285 sur ID21) : la technique XBIC (X-ray Beam Induced Current) permet d'enregistrer la réponse en courant du détecteur soumis à un microfaisceau X de 8,5 keV. La cartographie de cette réponse révèle les défauts de collection de charge. De plus, en utilisant un faisceau pulsé de quelques milliers de photons par pulse, nous pouvons synchroniser la réponse impulsionnelle en sortie de préamplificateurs, avec un dépôt d'énergie distribué sur l'épaisseur traversée variant de 0 à 4 MeV. Cela a permis de mesurer des efficacités de détection et des résolutions temporelles entre deux détecteurs placés l'un derrière l'autre.
- Des mesures sur faisceaux d'ions (ions carbone à 95 MeV/u au GANIL, et protons de 68 MeV à ARRONAX) ont complété les résultats obtenus à l'ESRF, avec des réponses à des dépôts d'énergie par une particule unique variant de 1 MeV à 25 MeV. À ARRONAX, une étude d'escalade en intensité jusqu'à 25 nA a été réalisée afin d'envisager la réalisation d'un moniteur faisceau à haute intensité (radiolyse pulsée, Flash therapy...)
- Enfin, le faisceau de protons de 3 MeV de l'IPN-Lyon permet de réaliser un dépôt d'énergie localisé sur quelques microns, de façon similaire à la source alpha, avec une intensité plus élevée.

Ces mesures ont permis de comparer les réponses de diamants polycristallins et hétéroépitaxiaux de quelques mm² à quelques cm², avec celles de diamants monocristallins de référence. Pour ce dernier, la réponse en courant de trous est similaire à celle d'un monocristal, alors que la réponse à un courant d'électrons est caractéristique des diamants polycristallins, avec une distance de collection de charge inférieure à leur épaisseur.

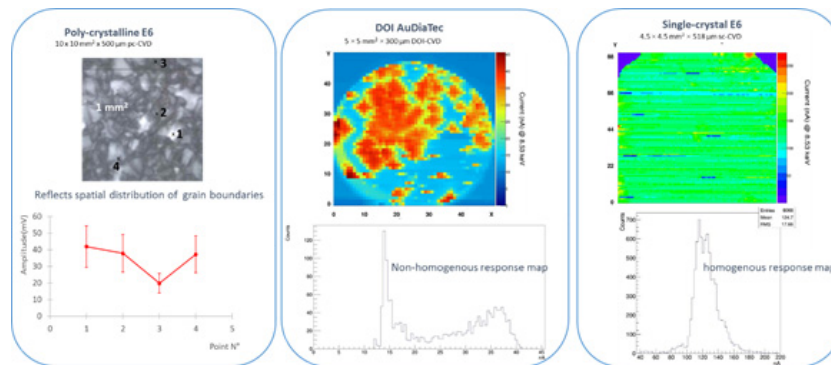


Figure 4 : carte de la réponse en courant (XBIC) d'un détecteur polycristallin (gauche) d'un DOI (centre) et d'un monocristal (droite). Le graphique en bas à gauche est la réponse en impulsion mesurée en 4 points du détecteur

La figure 4 illustre les cartes de réponse en courant de différents détecteurs, mesurées par XBIC sur ID21 (ESRF). Comme attendu, les polycristaux font apparaître un défaut de collection de charge aux joints de grains. Les cristaux hétéroépitaxiaux DOI font apparaître de fortes hétérogénéités à plus grande échelle.

Une expérience réalisée avec des protons de 68 MeV à ARRONAX a permis de mesurer l'efficacité absolue de détecteurs de 1 cm² pour des protons déposant environ 1 MeV dans le diamant. En l'absence dans le commerce de monocristaux de grande taille en grade détecteur, notre choix portera sur des diamants polycristallins. Ceux-ci seront commandés et assemblés en 2019. En parallèle, un circuit de lecture frontale ASIC est en cours de réalisation (projet transverse IN2P3 DIAMASIC).

Le Projet CLaRyS-UFT

Ce projet a été financé par le Plan Cancer pour la période 2017-2020 (partenaires LPSC : porteur, IPNL, CREATIS, CPPM). Il consiste à évaluer l'apport d'une résolution temporelle de 100 ps pour le contrôle en ligne de l'hadronthérapie. Un volet expérimental porte sur la réalisation de l'hodoscope diamant, et son utilisation en coïncidence avec une détection gamma-prompts rapide. Sur ce second point, deux techniques sont employées :

- une caméra à comptage temporel de photons de scintillation, Temporal, développée par Damavan Imaging. Cette caméra est constituée de deux monoblocs de scintillateurs CeBr lus par des matrices de SiPM (silicon photomultipliers) numériques avec échantillonnage à haute fréquence, ce qui permet une reconstruction 3D des vertex d'interaction dans les scintillateurs. L'acquisition avec deux blocs en coïncidence permet une utilisation en mode caméra Compton. Le prototype acquis fin 2018 dispose d'une entrée externe spécifique pour inclure le signal hodoscope, et l'ensemble caméra Temporal avec moniteur diamant sera testé sur faisceau courant 2019 ;

- des scintillateurs rapides. Une expérience de faisabilité a été réalisée à ARRONAX utilisant des scintillateurs BaF2 et LaBr dont la géométrie tronconique est optimisée pour une prise de temps à haute résolution, lus par des tubes photomultiplicateurs. Le dispositif expérimental est décrit sur la figure 9 : le faisceau de protons, d'intensité réduite pour permettre l'identification de chaque proton incident, traverse le détecteur diamant, puis une première cible fixe en PMMA de 1 cm d'épaisseur, puis est absorbé dans une seconde cible épaisse du même matériau, qui peut être translatée le long de la direction du faisceau. Les scintillateurs gamma sont disposés à 90° et 120° environ par rapport à la direction du faisceau, et pointent sur l'ensemble des deux cibles. Les impulsions de chaque détecteur (diamant et scintillateurs) sont numérisées par le module Wavatcher, développé par le LAL et l'IRFU, avec un échantillonnage de 3 GHz sur 8 voies, ce qui permet d'effectuer hors ligne les analyses de mesures de temps.

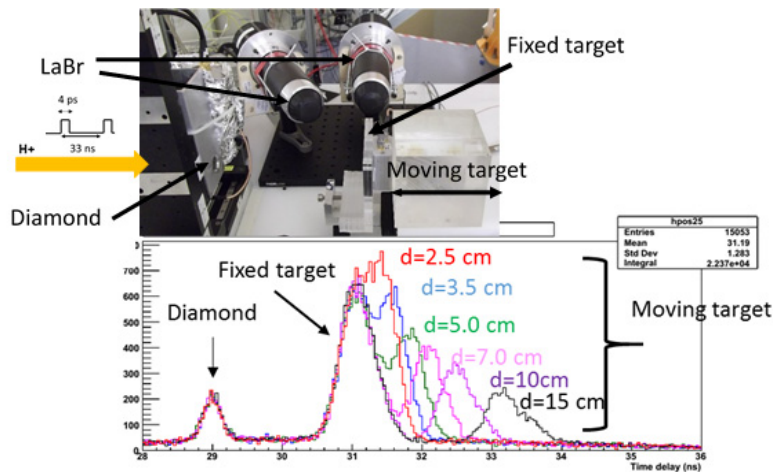


Figure 5 : Photographie du dispositif de détection gamma par temps de vol avec détecteur faisceau en diamant, et scintillateurs gamma LaBr, et cible en PMMA constituée d'une partie fixe (1cm) et d'une partie mobile (10 cm). Bas : spectres de temps de vol mesurés à 90° pour différentes positions de la cible mobile

La figure 5 montre les résultats de spectre en temps entre scintillateurs gamma et diamant obtenus lors de l'expérience. Avec une résolution de 111 ps rms (largeur du pic des gammas issus du diamant), nous pouvons résoudre les deux pics issus des deux cibles distantes de 2,5 cm. Une analyse plus poussée, basée sur les simulations Geant4 en fonction de la statistique, permet d'estimer une sensibilité de ce dispositif pour un déplacement de la cible à l'échelle de quelques millimètres, pour un spot faisceau de proton-thérapie.

Un second volet de ce projet porte sur les simulations, qui permettront d'évaluer l'apport d'une telle résolution temporelle obtenue à l'aide des détecteurs diamant sur l'imagerie Compton, la radiographie protons, et l'imagerie de vertex d'interaction de protons secondaires en carbone-thérapie.

Monitoring de la radiothérapie par rayonnement synchrotron

Ce projet fait l'objet de la thèse de Nicolas Rosuel (2018-2021), soutenue par le LabEx PRIMES. La radiothérapie par microfaisceaux consiste à irradier des tumeurs, ou des foyers épileptiques, à l'aide de microfaisceaux présentant des pics d'environ 50 μm espacés de 300 μm environ. La dose dans les pics est très élevée, de l'ordre du kGy, alors que la dose dans les vallées, due au halo en sortie de collimateur et au diffusé, n'est que de quelques Gy. Cette thérapie, développée à l'ESRF, s'avère très efficace pour améliorer le différentiel entre les effets aux tissus tumoraux et aux tissus sains, par rapport à une thérapie conventionnelle. Un enjeu, là aussi important, consiste à monitorer en ligne le traitement. Étant donné les flux très élevés dans les pics, similaires à ceux de la Flash-thérapie mais plus concentrés spatialement, nous proposons d'utiliser des détecteurs diamant avec lecture à grande dynamique de courant par intégration de charge. Des prises de données ont été réalisées sur la ligne médicale ID17 avant la fermeture de l'ESRF fin 2018. Un circuit ASIC est en cours de développement (stage d'apprentissage ingénieur de Lucas Tribouilloy). Étant donné le fort recouvrement thématique entre ce projet et le projet de valorisation HiDoRa soutenu par la SATT, ces développements menés au sein de l'Équipe de Physique Nucléaire et Applications Médicales sur les mesures de charge à haute dynamique devraient converger.

Détection de fragments de fission à l'ILL

Nous avons participé à une première expérience de mesure de fragments de fission par détecteurs diamant sur le spectromètre Lohengrin à l'ILL en 2018. Le but était de tester plusieurs détecteurs, notamment leur résolution et leur Pulse Height Defect, en fonction de la masse de fragments de fission d'une source de ^{235}U . L'objectif à terme est d'utiliser de tels détecteurs davantage résistants aux radiations que les détecteurs silicium. En collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire de Cracovie et l'INFN-Milan, nous avons pu tester plusieurs associations de détecteurs et préamplificateurs. La figure 6 illustre l'enregistrement de fragments pour différentes sélections de masse, charge et énergie au cours d'une nuit d'acquisition avec un diamant monocristallin ayant une surface utile de 2 mm de diamètre. L'analyse est en cours.

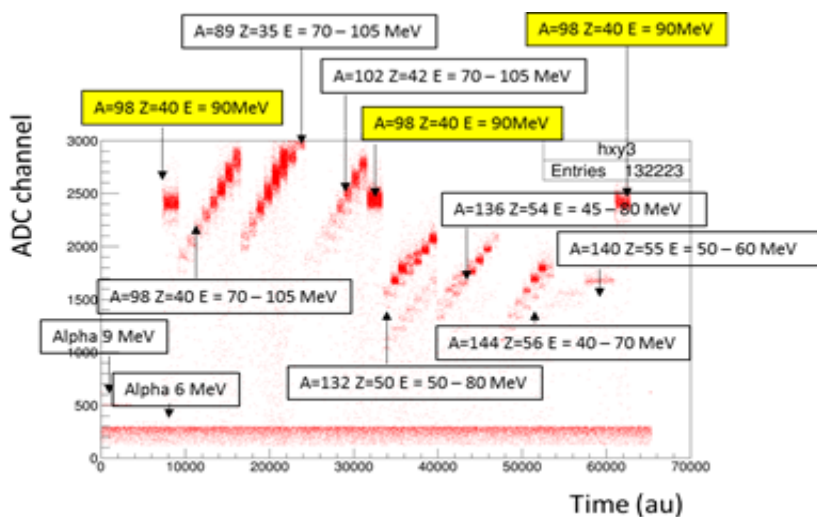


Figure 6 : Enregistrement, sur une longue durée, des amplitudes de signaux de spectroscopie d'un détecteur diamant monocristallin pour différentes sélections de fragments de fission sur Lohengrin.

Ce programme en collaboration avec l'ILL se poursuivra avec une étude d'utilisation de détecteurs diamant polycristallins de grande surface pour obtenir un étiquetage temporel à haute résolution d'un événement de fission, et effectuer des mesures de spectroscopie gamma par temps de vol (expérience FIPPS).

3.3.4 Radiothérapies ciblées

Contributeurs hors équipe :

D. Santos (CNRS)

Collaborations: IPN-Lyon, RSRM-Grenoble, ESRF, CHU-Grenoble, IAB-Grenoble, ILL

Contexte

Les thérapies ciblées visent à l'amélioration des approches de radiothérapies pour le traitement de cancers, en particulier pour chercher à apporter des solutions de traitement à des cancers radio-résistants et diffus (ex: gliomes de haut grade) ou non-localisés (tumeurs secondaires multiples) qui sont aujourd'hui incurables. Il s'agit de la combinaison de l'injection d'un agent de contraste ou d'une molécule chimique dans le corps du patient qui va s'accumuler préférentiellement dans la tumeur à traiter, suivi d'une irradiation externe dont la section efficace d'interaction sera plus importante avec ces agents, permettant un traitement local plus efficace de la tumeur et une épargne relative des tissus sains. Dans le cadre de la B/Gd-NCT (Boron or Gadolinium Neutron Capture Therapy), l'irradiation se fait avec un faisceau de neutrons épithermiques. Les neutrons thermalisés arrivant au niveau de la tumeur interagissent avec les noyaux de Bore-10 (ou Gd-157) contenus dans la molécule injectée et les produits de capture sont des particules de faible parcours et de haute toxicité pour la cellule cancéreuse origine de la capture. Pour la thérapie par photo-activation, un faisceau RX de basse énergie (-10-100 keV) est utilisé. L'interaction préférentielle avec les éléments de Z-élevé injectés tel que le Gadolinium (sous forme d'agent de contraste ou nanoparticules) permet d'augmenter l'efficacité locale de traitement de la tumeur via la production de nombreux électrons secondaires de très basse énergie. Malgré leur aspect prometteur, l'efficacité biologique et le contrôle précis de la dose délivrée pour ce type de traitement reste complexe à déterminer et à quantifier, de par la multitude des processus physiques, chimiques et biologiques impliqués.

Détermination des contributions à la dose en B/Gd-NCT

L'une des difficultés de la planification de traitement en NCT est de correctement considérer dans les calculs la « dose biologique » reçue par les tissus lors d'une irradiation par neutrons. Cette dose est complexe car elle résulte de plusieurs contributions d'origine différentes et ayant des facteurs d'efficacité biologique relative (EBR) différents. On peut ainsi séparer la dose liée : aux photons gamma résultants des captures neutroniques sur les protons du milieu ou les atomes de bore et gadolinium, aux reculs de noyaux ^{14}C et ^2H suite aux réactions de capture $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ ou $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ pour les neutrons thermiques, aux reculs des protons du milieu suite aux collisions nucléaires avec les neutrons épithermiques, et enfin aux particules que l'on cherche à produire pour le bénéfice thérapeutique de la NCT : les ions ^4He et ^7Li produits suite aux captures $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ et les électrons Auger et de conversion interne suite aux captures $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)^{158}\text{Gd}$. Dans ce cadre nous avons initié au sein du groupe un travail de modélisation en collaboration avec l'équipe PRISME-PHABIO de l'IPNL. La simulation réalisée avec le code Geant4 permet de suivre en détail chaque interaction physique primaire et secondaire des particules mises en mouvement et ainsi séparer les contributions de toute origine à la dose absorbée, aussi bien à l'échelle tumorale que micrométrique. Nous couplons ensuite ces résultats avec le code Nanox, développé à l'IPNL (Cunha et al. 2017, PMB, 62(4), 1248), capable de modéliser la réponse biologique issue de ces contributions, prenant en compte les effets stochastiques des interactions et le stress oxydatif. Les principaux résultats ont été obtenus avec le travail de stage de Lucie Miquel (6 mois, bourse Labex Primes).

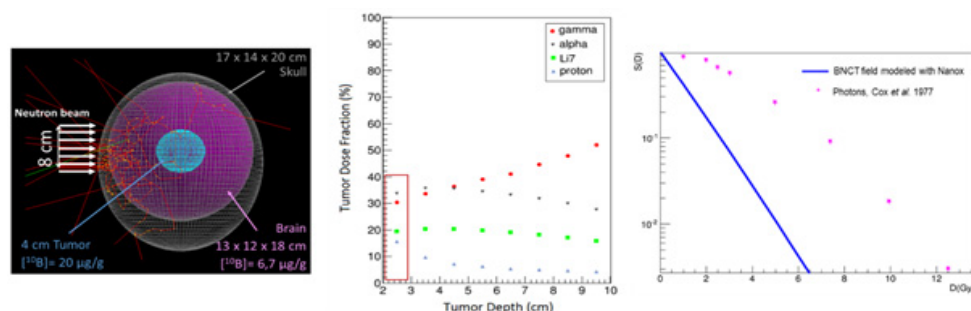


Figure 7 : Gauche: géométrie utilisée dans GEANT4 pour une irradiation d'un fantôme par faisceau de neutrons épithermiques; centre: fractions relatives de la dose physique en fonction de la position en profondeur de la tumeur; droite: prédiction (NanOx) du taux de survie cellulaire (lignée V79) par BNCT et par photons.

Nous avons pu déterminer la proportion des principales contributions à la dose en BNCT et GdNCT à l'échelle tumorale, à l'aide d'une géométrie réaliste de crâne humain présentant une tumeur cérébrale de 4 cm de diamètre, en fonction de la profondeur de celle-ci. Une première estimation de la réponse cellulaire au champ d'irradiation mixte obtenu a été faite avec le code Nanox. La Figure 7 reporte un résultat de ce travail qui a été présenté à la conférence ICNCT-17 (2016).

Photo-activation de gadolinium

L'un des paramètres critique pour l'efficacité de ce type de traitement est la distribution à l'échelle micrométrique et intracellulaire de l'élément lourd au sein de la tumeur (Delorme et al. 2017, Med. Phys. 44(11), 5949). Afin d'étudier la radiobiologie d'une telle approche, il est nécessaire de connaître précisément cette distribution. Dans ce cadre, deux expériences ont été mises en place à l'ESRF: l'une d'imagerie nanométrique (résolution 50 nm) sur la ligne ID-16 (Fév. 2017) afin de déterminer la distribution intracellulaire d'agent de contraste gadolinium sur des cellules de glioblastome F98, l'autre sur la ligne ID-17 (Juillet 2017) afin de déterminer la survie cellulaire associée à l'irradiation synchrotron de ces cellules incubées. Les images réalisées sur ID-16 de cellules F98 incubées avec deux agents de contrastes gadolinium (Magnevist ou Dotarem) ont montré une accumulation très importante dans le cytoplasme sous forme de vésicules (lysosomes) ainsi qu'une formation d'agrégats de zinc dans le cas du Dotarem. Les résultats de ces deux expériences sont encore en cours d'analyse et quantification, et nécessitent des compléments avant publication. La possibilité de réaliser des images d'une telle précision, avec une quantification par espèce atomique, ouvre des perspectives quant à l'amélioration des modélisations des effets radiobiologiques dans le cas des thérapies ciblées photons et GdNCT.

3.3.5 Pour en savoir plus

Principales publications durant la période :

Monitorage de faisceaux de photons

[Design de l'électronique de lecture TraDeRa](#) par L. Gallin-Martel et al., 2017

Monitorage en ligne

["Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy: a review"](#), J. Krimmer et al., 2018

["A large area diamond-based beam tagging hodoscope for ion therapy monitoring"](#), M.-L. Gallin-Martel et al., 2018

Radiothérapies ciblées

[Comparison of gadolinium nanoparticles and molecular contrast agents for radiation therapy-enhancement.](#)

R. Delorme et al., 2017

[Theoretical approach based on Monte-Carlo simulations to predict the cell survival following BNCT](#), R. Delorme et al., 2016

Thèses soutenues durant la période :

- 1- I. Fonteille - *Étude et conception d'un détecteur bidimensionnel transparent permettant le suivi en temps réel de l'administration des traitements de radiothérapie modulés en intensité*- 27 mai 2016 - Dir. J.Y. Giraud, co-encadrant: Y. Arnoud
- 2- R. Fabbro - *Modélisation d'un accélérateur linéaire clinique en vue de l'exploitation d'un détecteur à transmission dédié au contrôle qualité en radiothérapie* - 6 novembre 2017 - Co encadrant Y. Arnoud
- 3- ML Gallin-Martel, Habilitation à diriger les recherches, *"Développement de détecteurs, caractérisations, analyse de données et modélisation, du domaine de la physique des hautes énergies à celui de la physique médicale"*, Habilitation à diriger les recherches, Université Grenoble Alpes, France (2016).

3.4 Neutrons pour la science et la société (projet transverse)

Contributeurs :

D. Santos, V. Ghetta, M. Hervé (doctorante)

Personnel des services techniques

O. Guillaudin, J.-F. Muraz, N. Sauzet (Service Détecteurs et Instrumentation)

J. Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques)

The neutrons having no electric charge can go very deep into the matter opening a very large scope of applications. In addition, neutrons can be captured by other nuclei producing a huge amount of energy release the key point to produce a huge number of neutrons by an accelerator is to have a target coping with a high density power. The activities of our team working on Neutrons for Science and Society have concerned two targets (Beryllium and Lithium) allowing a high power density (3 kW/cm²), a thermal test facility developed at the LPSC and a new moderator or Beam Shape Assembly (BSA) adapted to the Beryllium target.

3.4.1 Introduction

Hormis le domaine spécifique des études nucléaires (réacteurs, physique nucléaire, métrologie neutron...), les neutrons sont utilisés pour l'imagerie, le dopage par transmutation, la production d'isotopes ou une thérapie par capture neutronique pour lutter contre le cancer. Ces applications demandent des forts flux de neutrons ($> 10^{12}$ n.cm⁻².s⁻¹) de basse énergie (< 10 keV). Ces sources de neutrons (CANS : Compact Accelerator Neutrons Sources), contrairement à celle des réacteurs, peuvent être pulsées et mieux adaptées aux besoins des applications.

Le principe de la thérapie par capture neutronique (NCT : Neutron Capture Therapy) est d'introduire à l'intérieur des cellules tumorales, par des vecteurs spécifiques et sélectifs, des molécules comportant des noyaux de ¹⁰B, qui ont une très grande section efficace de capture (≈ 3840 barns) pour les neutrons thermiques. Des particules α et des noyaux de ⁷Li sont produits lors de la réaction de capture ¹⁰B(n, α)⁷Li, délivrant localement des doses létales aux tissus tumoraux. La NCT est actuellement peu développée principalement en raison de la grande difficulté de pouvoir accéder à des sites de réacteurs nucléaires adaptés à un environnement clinique. Avec un flux de neutron de l'ordre de 10^{13} n.cm⁻².s⁻¹ au niveau de la cible, un traitement nécessiterait seulement un ou deux cycles d'irradiation de 30 minutes par tumeur. Pour produire un tel flux, il est tout à fait envisageable d'utiliser un accélérateur compact qui pourrait être implanté dans un hôpital de par sa taille réduite et son coût relativement faible. Des projets avancés d'AB-NCT (Accelerator Based-Neutron Capture Therapy) existent au Japon, en Italie, Angleterre, Israël, Russie et Argentine.

3.4.2 Développement de cibles Lithium et Beryllium

Les cibles doivent supporter de très fortes puissances (15-50 kW) concentrées sur des petites surfaces (≈ 10 cm²). Leur conception représente un réel défi technologique. Les réactions les plus adaptées pour la production des neutrons sont : ⁹Be(p, n)⁹B, ⁹Be(d, n)¹⁰B et ⁷Be (p, n)⁷Be avec des faisceaux d'énergie entre 1,5 et 3 MeV. L'équipe du LPSC conçoit et développe deux solutions originales pour des cibles du type ⁹Be et ⁷Li.

Cible Beryllium

Une cible prototype de Beryllium, de taille réduite par rapport à un dispositif de pleine puissance, est actuellement en cours de développement. Cette cible est constituée par une matrice de graphite tournante de 30 cm de diamètre servant à la fois de matériau de structure et de massif dissipatif de la chaleur engendrée par le dépôt d'énergie du faisceau de deutons ou protons. A la surface de la matrice de graphite, une fine couche de Beryllium de 8 μ m d'épaisseur est déposée au niveau de la zone annulaire d'impact du faisceau. Ce dépôt de Beryllium est réalisé par pulvérisation par faisceau d'ion (IBS) à l'intérieur même de la chambre à vide de la cible. Ce concept original a le double avantage de pouvoir non seulement produire la couche initiale de Beryllium

mais également de régénérer celle-ci, si besoin, en ligne et à mesure de l'utilisation de la cible. L'énergie transmise au massif de graphite par le faisceau est évacuée par rayonnement thermique vers les parois de l'enceinte, elles-mêmes refroidies par circulation d'eau. La température atteinte par le Béryllium ne devant pas dépasser 850° , afin de rester dans une gamme de pression partielle de vapeur inférieure à $3 \cdot 10^{-6}$ mbar, des simulations numériques ont été réalisées pour dimensionner le système de refroidissement et définir la vitesse optimum de rotation. Pour valider les résultats des simulations numériques, et aussi pour étudier la stabilité de la couche mince de béryllium, des tests thermiques sous faisceau d'électrons sont prévus avant de procéder aux essais en conditions réelles sous faisceaux.

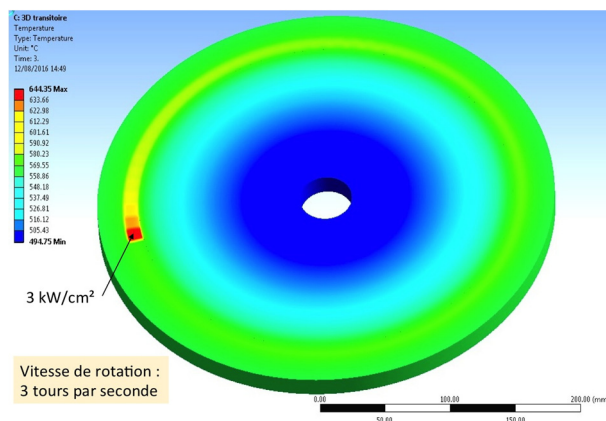


Fig. 1 : Simulation thermique de la cible Be/graphite sous l'effet d'un faisceau d'une puissance de 3 kW répartie sur 1 cm².

Cible Lithium

Une cible de lithium est également étudiée et fait actuellement l'objet d'une démarche de dépôt de brevet.

Ligne expérimentale de tests thermiques

Un banc de test thermique capable de produire un faisceau d'électron de 3 kW sur 1 cm² de surface a été développé. Les électrons, produits au sein d'une source ECR de type COMIC, sont extraits du plasma d'argon et accélérés à une énergie de 20 keV pour un courant total de 150 mA. Une coupelle de Faraday amovible et refroidie permet de mesurer le courant extrait de la source. Enfin, une optique faisceau constituée d'un solénoïde et de deux défecteurs permet de focaliser et de mettre en forme le faisceau d'électrons. Les cibles de Béryllium et de Lithium peuvent être couplées en bout de cette ligne de faisceau d'électrons pour tester leur comportement thermique sous une densité de puissance représentative de 3 kW/cm².

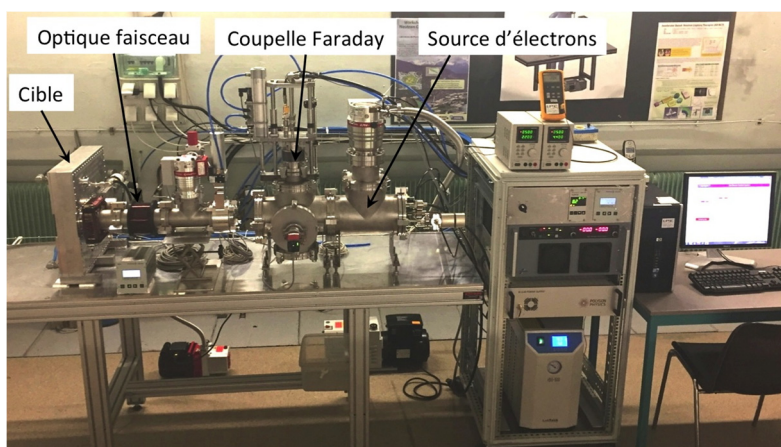


Fig. 2 : Banc de tests thermiques avec faisceau d'électrons

3.4.3 Thermalisation et mesure du champ neutronique

Les neutrons produits au niveau de la cible ont des énergies de l'ordre de quelques MeV. Afin de produire un champ épithermique d'une énergie inférieure à 10 keV, on doit développer des modérateurs autour de la cible. Ces champs neutroniques pourront être caractérisés par le détecteur Mimac-FastN (voir partie valorisation).

Caractéristiques du modérateur à eau lourde

La thermalisation du spectre neutronique rapide issu de la cible est effectuée grâce à un modérateur afin de produire un champ épithermique approprié au traitement. L'IAEA recommande une dose équivalente sur les tissus sains inférieure à 11 Gy-Eq et supérieure à 40 Gy-Eq sur la tumeur pour assurer l'efficacité du traitement. Un flux de 10^9 n/cm.s est conseillé pour assurer un traitement de moins d'une heure au patient.

Le modérateur développé est composé principalement d'une demi sphère d'eau lourde, comprenant des couches de fluorure d'aluminium et d'une enveloppe de plomb. Le spectre neutronique issu de la réaction ${}^9\text{Be}(d,1,45\text{MeV}, n) {}^{10}\text{B}$ est utilisé à l'entrée du modérateur dans la simulation.

Différentes dimensions ont pu être validées selon les critères de l'IAEA. Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la dose équivalente sur la tumeur et les tissus sains (le cerveau ici) en fonction du rayon de la demi sphère principale d'eau lourde du modérateur. Pour 24 cm de rayon, voir figure 3, la dose sur la tumeur est estimée à 48,5 Gy-Eq et la dose sur les tissus sains à 3,6 Gy-Eq.

Les gammas induits par la réaction de production neutronique ne sont pas pris en compte dans ces calculs mais leur contribution à la dose ne devrait pas dépasser 0,8 Gy-Eq.

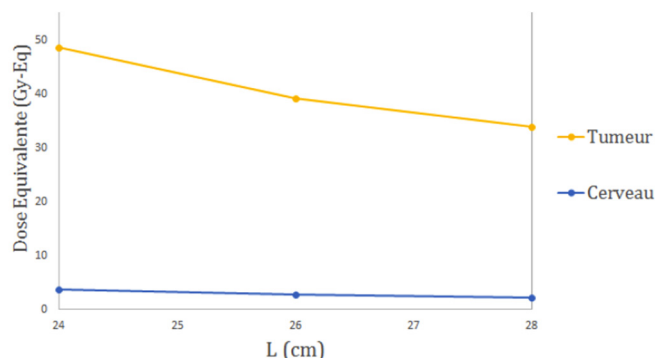


Fig. 3 : Dose équivalente sur les tissus sains et sur la tumeur en fonction de la longueur caractéristique (rayon) du modérateur

Évaluation du nombre de captures sur la tumeur en fonction de la profondeur dans le cerveau

Des simulations Monte Carlo ont été réalisées avec le code de calcul MCNP6. Le modèle utilisé présente les caractéristiques suivantes : une tête sphérique de 8 cm de rayon reprenant la composition ICRU-46 du cerveau, du crâne et de la peau ; une tumeur de 1 cm de diamètre dont le centre est placé à différentes profondeurs. La concentration de bore 10 dans le sang est établie à 15 ppm ($\mu\text{g/g}$) et le ratio de concentration entre le sang et la tumeur est fixé à 3,5 pour la tumeur et 1,5 pour la peau. Ces paramètres correspondent aux concentrations estimées lors de l'utilisation du BPA ($\text{C}_9\text{H}_{12}\text{BNO}$, p-boronphénylalanine) comme porteur du bore. La tumeur est irradiée par un champ neutronique mono-énergétique sous la forme d'un disque de 1,5 cm de rayon. L'observable d'intérêt ici est le nombre de captures sur la tumeur par seconde et par unité de volume.

L'objectif est de comparer les résultats obtenus à faible énergie (entre 10 et 1000 eV) avec ceux obtenus pour 10 keV puisque cette énergie représente l'énergie limite haute du domaine épithermique [1 eV - 10 keV], recommandée pour le traitement des tumeurs non-superficielles. Les résultats sont présentés sur la figure 4

suivante. A énergie fixée, le taux de captures sur la tumeur diminue lorsque la profondeur augmente. Pour chaque profondeur, on observe un taux de captures plus important à énergie plus faible : le nombre de captures sur la tumeur augmente lorsque l'énergie diminue. Pour une même intensité source on obtient donc une dose plus importante à des énergies inférieures à 10keV.

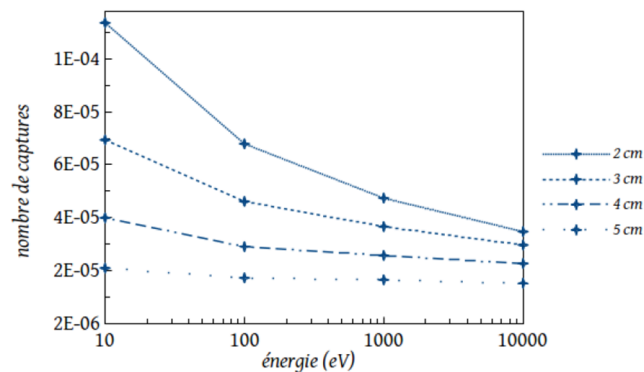


Fig. 4 : Nombre de captures par seconde, par cm^3 en fonction de l'énergie incidente

3.4.4 Pour en savoir plus

Monitoring de faisceaux de photons

[Design de l'électronique de lecture TraDeRa](#) par L. Gallin-Martel et al., 2017

Monitoring en ligne

["Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy: a review"](#), J. Krimmer et al., 2018

["A large area diamond-based beam tagging hodoscope for ion therapy monitoring"](#), M.-L. Gallin-Martel et al., 2018

Radiothérapies ciblées

[Comparison of gadolinium nanoparticles and molecular contrast agents for radiation therapy-enhancement](#). R. Delorme et al., 2017

[Theoretical approach based on Monte-Carlo simulations to predict the cell survival following BNCT](#), R. Delorme et al., 2016

Thèse de doctorat

Isabelle Fonteille, ["Etude et conception d'un détecteur 2D transparent permettant le suivi en temps réel de l'administration des traitements rcmi"](#). Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France (2016).

Robin Fabbro, ["Modélisation d'un accélérateur linéaire clinique en vue de l'exploitation d'un détecteur à transmission dédié au contrôle qualité en radiothérapie"](#), Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France (2017).

Habilitation à diriger les recherches

Marie-Laure Gallin-Martel, ["Développement de détecteurs, caractérisations, analyse de données et modélisation, du domaine de la physique des hautes énergies à celui de la physique médicale"](#), Habilitation à diriger les recherches, Université Grenoble Alpes, France (2016).