

> Mercredi 3 avril

09 h 05 - 10 h 30 Salle Marie Mauron

SESSION PARALLÈLE

> **MÉTROLOGIE DES NEUTRONS - Caractérisation neutronique et installations**

Président: Amokrane ALLAOUA

Docteur en physique neutronique et instrumentations

Enya MOBIO - Conception d'un champ neutronique épithermique pour l'étalonnage d'instruments de radioprotection et développement d'une méthode de spectrométrie des neutrons dédiée à leur caractérisation entre 0,5 eV et 10 keV.

Ronan LELIÈVRE - Caractérisation des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes.

Claire LÉONHART - Détecteurs diamants ultra-minces pour le monitoring en ligne de micro-faisceaux d'ions.

Diane QUEVAUVILLERS - Caractérisation et utilisation de scintillateurs stilbène pour la métrologie et la spectrométrie des neutrons entre 100 keV et 22 MeV sur AMANDE et CEZANE.

Pierre SOLÉ - Traitement des incertitudes sur les données nucléaires.

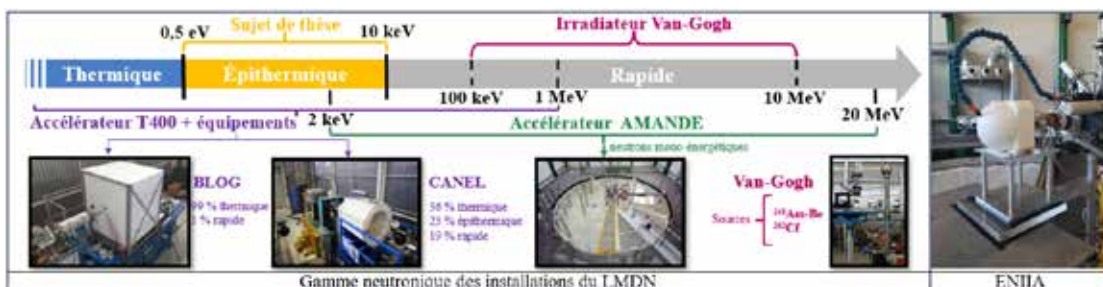
SUJET DE LA THÈSE

Conception d'un champ neutronique épithermique pour l'étalonnage d'instruments de radioprotection et développement d'une méthode de spectrométrie des neutrons dédiée à leur caractérisation entre 0,5 eV et 10 keV

Doctorante :	Enya MOBIO
Date du début de la thèse :	11/10/2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SDOS/LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Richard BABUT
Direction de la thèse :	Daniel SANTOS/LPSC Grenoble
École doctorale :	Grenoble-Alpes – École doctorale de physique - ED 47
Financement de la thèse :	IRSN & LNE

Le sujet de cette thèse répond à la question 3 de la stratégie scientifique de l'IRSN qui porte en partie sur l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions des travailleurs, de la population, des patients et des écosystèmes. Le LMDN est l'unique laboratoire français chargé de la métrologie des neutrons. Dans le cadre de ses missions, le LMDN dispose d'une plateforme expérimentale permettant de produire des champs neutroniques de référence. Sur les installations CEZANE et AMANDE-MIRCOM, plusieurs dispositifs (voir image) permettant de couvrir les domaines énergétiques dits thermique et rapide. Le domaine épithermique demeurant non représenté dans la métrologie française, l'objectif de cette thèse porte sur la conception d'un dispositif produisant des neutrons sur cette gamme énergétique afin d'obtenir des points de mesure de référence dosimétrique. Ces nouveaux points de mesure seront un complément d'importance majeure pour l'étalonnage d'appareils de radioprotection et de dosimètres destinés aux travailleurs du nucléaire. De plus les champs épithermiques sont utilisés pour des traitements de radiothérapie telle que la BNCT mais également lors de mesures de l'humidité des sols. Cette thèse s'articule selon deux grandes parties. Dans un premier temps la conception d'un champ neutronique épithermique puis dans un second temps sa caractérisation grâce à une méthode de spectrométrie. Un premier dispositif adaptable au T400 et multimatériaux modérateurs a été obtenu par simulations MCNP. En parallèle, un deuxième dispositif a été réalisé en collaboration avec le LPSC grâce à un algorithme d'optimisation topologique d'un code MCNP. Ces dispositifs répondent aux contraintes mécaniques, techniques et dosimétriques (dépôt de 1 mSv en moins de 8 h). Cependant, une étude sur leur faisabilité a montré qu'ils excédaient tous deux le budget fixé. Des discussions autour du financement sont en cours. Pour tester la méthode de caractérisation d'un champ épithermique, un dispositif moins complexe a été modélisé puis réalisé : ENIIA (*Epithermal Neutron dispositif for IRSN Irradiations on AMANDE*). Une campagne de caractérisation avec la méthode d'activation de feuilles d'or ainsi que le détecteur NFM (*Neutron Field Monitor*) développé par le LPSC est planifiée fin janvier 2024 afin de caractériser ce champ.

Mots clés : neutrons, détection, instrumentation, métrologie.



SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes

Doctorant :	Ronan LELIÈVRE
Date du début de la thèse :	01/11/2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SDOS/LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Amokrane ALLAOUA
Direction de la thèse :	Julien FUCHS/École polytechnique
École doctorale :	Institut Polytechnique de Paris – École doctorale de l'institut polytechnique de Paris (ED IP PARIS) - ED 626
Financement de la thèse :	IRSN & LULI - École Polytechnique Paris

Les lasers ultra-intenses représentent un nouveau moyen de produire des champs neutroniques, plus compact et versatile que les réacteurs nucléaires ou les accélérateurs. Le champ électrique créé par l'impulsion laser au sein d'une cible fine ($\sim \mu\text{m}$) peut atteindre plusieurs TV/m, permettant l'accélération de protons de plusieurs dizaines de MeV. Ces protons sont ensuite interceptés par une seconde cible, appelée convertisseur, dans laquelle ils induisent des réactions nucléaires et donc la production de neutrons^[1]. Cette technique est ainsi capable de générer des flux très intenses ($> 10^{18}$ neutrons/s) à des énergies allant jusqu'à quelques dizaines de MeV, permettant alors d'envisager de faire de l'imagerie neutronique^[2] ou de reproduire en laboratoire le processus rapide de nucléosynthèse responsable de la création des éléments lourds au-delà du bismuth^[3]. La nécessité de caractériser ces champs neutroniques s'inscrit dans la volonté de prouver la faisabilité de ces applications mais également dans le but d'assurer la radioprotection et de quantifier les risques associés à ces nouvelles installations en développant des outils diagnostiques adaptés aux caractéristiques des sources de neutrons produites par laser (durée d'émission très courte ($< \text{ns}$), flux intense, environnement bruité, ...). Les détecteurs passifs, ou possédant une électronique ultra-rapide, semblent être des candidats de choix pour faire face à ces problématiques. En complément d'un travail de simulation des termes sources et de la réponse des détecteurs via l'utilisation des codes Monte-Carlo MCNP & Geant4, des dosimètres à bulles, un dispositif Temps de Vol ainsi que des échantillons d'activation ont été utilisés sur diverses installations, comme APOLLON (Saclay) et PETAL (LMJ, Le Barp), afin d'optimiser et de caractériser ces émissions neutroniques. Les premiers résultats des mesures réalisées lors de ces expériences ont notamment permis de mettre en évidence la possibilité de produire des neutrons de quelques dizaines de MeV avec une fluence importante, encourageant la poursuite du développement d'un spectromètre neutron par activation, particulièrement adapté à la mesure de flux intenses de neutrons rapides dans un environnement bruité.

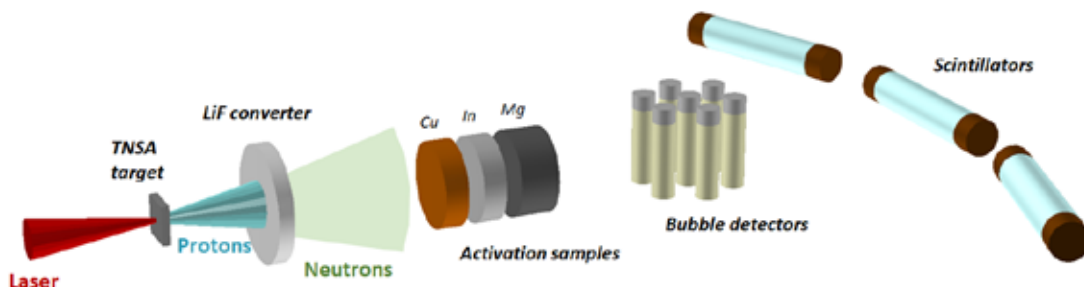
Mots clés : neutrons, laser, détection, activation.

Références

[1] Phys. Plasmas 11, 3404 (2004).

[2] Radiat. Phys. Chem. 71, 853-861 (2004).

[3] Matter Radiat. Extremes 7, 024401 (2022).



SUJET DE LA THÈSE

Détecteurs diamants ultra-minces pour le monitoring en ligne
de microfaisceaux d'ions

Doctorante :	Claire LÉONHART
Date du début de la thèse :	01/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SDOS/LMDN
Référent IRSN de la thèse :	François VIANNA
Direction de la thèse :	Marie-laure GALLIN-MARTEL/LPSC Grenoble
École doctorale :	Grenoble-Alpes – École doctorale de physique - ED 47
Financement de la thèse :	CNRS-80 - Prime

L'installation MIRCOS de l'IRSN, exploitée par le LMDN, sur le site de Cadarache, dispose d'un microfaisceau d'ions extrait à l'air capable d'irradier des échantillons biologiques vivants à l'échelle micrométrique pour étudier les mécanismes cellulaires et sub-cellulaires post-irradiation.

Cette thèse s'inscrit dans la question de recherche 5 de la stratégie scientifique de l'IRSN, visant à mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Afin d'utiliser les capacités de la ligne dans leur totalité, et en particulier d'étudier les effets d'une exposition à de faibles doses (question 1) avec une irradiation à un ion unique par cellule, il est nécessaire de pouvoir détecter les ions délivrés lors de l'irradiation. Le détecteur diamant, un semi-conducteur à grand gap et à réponse rapide, développé dans le cadre du projet Défi-Diams (collaboration LPSC, LP2I Bordeaux, Institut Néel, IRSN), doit permettre de remplir ce besoin pour les protons mais également pour les ions plus lourds disponibles. Le dispositif sera également adapté pour la ligne de micro-irradiation de la plate-forme AIFIRA du LP2I Bordeaux.

Le travail de thèse comprend la réalisation de ce dispositif, depuis les étapes de design, à des développements matériaux autour de la gravure du diamant et à la fabrication et l'intégration dans un porte-échantillon compatible avec les lignes d'irradiation. Les détecteurs seront ensuite caractérisés sous faisceaux d'ions. Le travail réalisé jusqu'à présent se concentre sur la gravure du diamant. En effet, afin d'être utilisé comme détecteur en transmission, en amont des échantillons biologiques, le diamant doit être aminci afin de perturber le faisceau (spatialement et en énergie) au minimum.

Cependant, la gravure du matériau diamant n'est pas tâche aisée. Les techniques existantes utilisent un plasma bombardé sur la surface du diamant, permettant de le graver avec des vitesses atteignant quelques micromètres par heure. En particulier, la technique de Reactive Ion Etching (RIE), développée à l'Institut Néel pour la gravure du diamant utilise un mélange de gaz CF₄/O₂ permettant d'atteindre la vitesse de 4,8 µm/h. Cette technique doit être adaptée pour la gravure profonde : l'utilisation d'un masque diamant polycristallin protégeant les zones à ne pas graver permet d'obtenir les motifs carrés et circulaires des fenêtres de détection. Un processus de fabrication, associant également des caractérisations portant sur la qualité de surface et l'épaisseur à différentes étapes de la gravure a été mis en place. Suivant celui-ci, un premier prototype est en cours de réalisation.

Mots clés : microfaisceaux d'ions, monitoring faisceau, radiobiologie, détecteurs diamant, gravure RIE.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation et utilisation de scintillateurs stilbène pour la métrologie et la spectrométrie des neutrons entre 100 keV et 22 MeV sur AMANDE et CEZANE

Doctorante :	Diane QUEVAUVILLERS
Date du début de la thèse :	03/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SDOS/LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Michaël PETIT
Direction de la thèse :	Laurent OTTAVIANI/AMU & Christelle REYNARD-CARETTE/CNRS Marseille
École doctorale :	Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & LNE

La thèse se positionne sur la question 3 de la stratégie de l'IRSN pour l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque d'expositions. Le LMDN, Laboratoire de micro-irradiation et de métrologie et dosimétrie des neutrons est en charge par le LNE, Laboratoire nationale de métrologie et des essais, des références métrologiques françaises en débit de fluences neutroniques et dosimétriques associées. Ainsi, le LMDN cherche à améliorer ses références pour perfectionner l'étalonnages des dosimètres et des détecteurs de neutron.

En 2020, des cristaux stilbènes plus purs ont démontré une nouvelle capacité de détection et de discrimination entre neutrons et photons particulièrement entre 100 keV et 1 MeV, décade non couverte aujourd'hui par les scintillateurs classiques. Le LMDN a acheté des nouveaux scintillateurs avec ces cristaux pour améliorer la détermination de ses références et élargir sa plage d'étude. Le LMDN est aussi responsable de deux sources de neutrons qui sont les références françaises primaires pour la métrologie de la dosimétrie dans ce domaine. Malheureusement, ces sources sont imparfaites et aujourd'hui, aucun moyen ne permet de corriger leurs imperfections.

Ainsi, la thèse réalisée avec Aix-Marseille Université (IM2NP UMR 7334) est axée sur les besoins métrologiques du laboratoire. Pour cela, un des trois objectifs de la thèse est la caractérisation de ces scintillateurs pour les photons réalisées avec une simulation MCNP et les neutrons avec une mesure de spectre blanc. Une étude spécifique des fonctions réponses sera réalisée pour la plage 100 keV-1 MeV, peu connue. Le second objectif est d'exploiter la réponse très rapide des scintillateurs pour pouvoir étendre la méthode de temps de vol à la plage 100 keV-1 MeV sur l'installation AMANDE de l'IRSN. Cette méthode est la méthode métrologique usuelle pour déterminer l'énergie des neutrons basée sur la différence entre le temps d'émission et de détection du neutron après avoir « volé » sur une distance connue.

Enfin, le dernier objectif est le suivi de la décroissance de ces sources afin de déterminer des correctifs et donc d'étalonner au mieux les dispositifs de mesure neutrons. Des mesures sur différentes sources du laboratoire ou d'autres laboratoires de références ont été réalisé ou seront réalisées avec la méthode du temps de vol en coïncidence. Cette méthode dite « de vérification croisée » permettra également de vérifier périodiquement les fonctions réponses des scintillateurs déterminées précédemment. Cet ensemble de moyens de détection permettra de répondre aux besoins métrologiques du laboratoire.

Mots clés : scintillateur, neutron, métrologique, Stilbene.

SUJET DE LA THÈSE

Traitement des incertitudes sur les données nucléaires

Doctorant :	Pierre SOLÉ
Date du début de la thèse :	14/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SNC/LN
Référent IRSN de la thèse :	Vaibhav JAISWAL
Direction de la thèse :	Eric DUMONTEIL/CEA
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN & CEA

Dans le cadre de ses missions d'expertise, l'IRSN utilise des outils de simulation pour évaluer la sûreté-criticité et la sûreté des réacteurs. Au niveau microscopique, la simulation des interactions neutron-noyau s'appuie sur des modèles de physique nucléaire matérialisés par des « données nucléaires ». Ces données, cruciales pour ces simulations, comportent des incertitudes intrinsèques. La prise en compte de cette connaissance imparfaite est nécessaire pour anticiper de manière réaliste le comportement des installations nucléaires.

Jusqu'à présent, le code américain NJOY était utilisé pour ces analyses d'incertitudes, limitant la compréhension et la personnalisation des traitements d'incertitudes. Mon travail de thèse se concentre sur le traitement et la propagation des incertitudes liées à ces données, en développant une méthodologie qui offre une transparence et une adaptabilité accrues par rapport aux méthodes précédentes. Cette avancée s'inscrit pleinement dans la démarche de l'IRSN visant accroître la pertinence de l'expertise de sûreté et ne pas omettre de risque significatif.

La contribution de mon étude est le développement d'un module, nommé COP (COvariance Processing), au sein du code de traitement des données nucléaires GAIA de l'IRSN. Ce module vise à faciliter la propagation d'incertitude en simulation neutronique.

Mon programme se décompose en plusieurs axes clés :

- Traitements des Données** : Étude approfondie de l'encodage des incertitudes dans les évaluations de données nucléaires. Intégration de formules et modèles spécifiques de physique nucléaire pour l'interprétation des données.
- Développement du module COP** : Création et intégration du module COP dans GAIA pour une gestion efficace des incertitudes.
- Comparaison et Validation** : Utilisation et comparaison avec des outils internationaux tels que ERRORR (NJOY) et PUFF-IV (AMPX) pour valider l'efficacité de COP.
- Méthodes de propagation des incertitudes** : Application de diverses méthodes, dont la théorie des perturbations et la méthode dite « Total Monte-Carlo », pour propager les incertitudes dans les simulations.

La complexité de l'encodage des données nucléaires et la compréhension des formalismes des paramètres de résonance ont représenté des défis majeurs. Le développement d'une méthode pour extraire et propager les incertitudes sur ces paramètres a nécessité une innovation technique et théorique significative.

Mots clés : données nucléaires, interactions neutron, noyau, neutronique, incertitudes.