



## Thèse de Doctorat

# Architectures avancées de dosimètres à fibres optiques

**Ecole Doctorale** : EDSIS 488 (université de Saint-Etienne)

**Directeur de thèse** : Prof. Sylvain Girard, [sylvain.girard@univ-st-etienne.fr](mailto:sylvain.girard@univ-st-etienne.fr),  
+33 (0)477915812

**Co-directeur de thèse** : Dr-HDR Philippe Paillet, [philippe.paillet@cea.fr](mailto:philippe.paillet@cea.fr), +33 (0)169265089

**Lieu de thèse** : CEA DAM Ile de France, 91290, Arpajon

**Nationalité Française ou Européenne requise**

**Contexte-** Une caractérisation fine des environnements radiatifs en termes de dose (fluence) et de débits de dose (flux) reste indispensable aux études de vulnérabilité ou de durcissement des différentes technologies, microélectronique, photonique, matériaux devant opérer au sein de ces environnements extrêmes. Ces environnements, issus des différents domaines du nucléaire (*spatial, militaire, médecine, accélérateurs, démantèlement, fusion, fission, stockage*) combinent très souvent ces contraintes radiatives avec d'autres contraintes environnementales telles que des perturbations électromagnétiques, thermiques ou chimiques. Si de nombreuses technologies existent pour la mesure de dose et de débits de dose, celle basée sur l'emploi de fibres radiosensibles est en plein essor. En effet, les capteurs à fibres optiques à base de silice peuvent exploiter deux effets liés aux radiations dans les verres : l'atténuation induite par irradiation (RIA) et l'émission induite par irradiation (RIE), pour fournir un suivi en temps réel des paramètres radiatifs [1,2]. Ce type de capteurs possède les avantages suivants :

- Les fibres optiques sont de taille très réduite, leur cœur correspondant au volume sensible ayant un diamètre de quelques microns, permettant de limiter l'impact du capteur et ouvrant la voie à de la micro-dosimétrie. Etant constituées d'un diélectrique, elles sont intrinsèquement immunes à la majorité des perturbations électromagnétiques.
- Les fibres optiques sont principalement sensibles aux effets d'ionisation, directe ou secondaire, elles permettent donc de détecter la dose déposée par différents types de particules : protons, électrons, neutrons, photons. Elles ne permettent pas en revanche, aujourd'hui, de discriminer les différents types de particules ou différentes énergies.
- Les dosimètres à fibres optiques, basés sur la RIA, permettent de fournir une cartographie 1D de la dose déposée le long d'une fibre optique. Un tel dosimètre est aujourd'hui implémenté au CERN sur la base des études menées en collaboration avec l'UJM [3]. Ces systèmes permettent de suivre des doses jusqu'à des niveaux de l'ordre du 100krad (1 kGy).
- Les dosimètres à fibres optiques, basés sur la RIE, permettent de monitorer en temps réel le débit de dose de radiations. De récents travaux, issus d'une thèse précédente au CEA DAM, ont montré que la réponse de tels dosimètres est linéaire sur plus de douze décades de débits de dose [4], ce qui est très intéressant pour les environnements à forts flux de radiations tels que ceux rencontrés dans le domaine de la fusion ou de la protonthérapie. Des études préliminaires ont montré leur capacité à caractériser des faisceaux pulsés [4,5].

**Projet doctoral** - De nombreux travaux sont en cours sur cette thématique, notamment ceux menés avec l'UJM et ses partenaires. Ils visent principalement à optimiser les capteurs par



une approche matériau (nouveaux types de fibres optiques) ou systèmes (nouvelles architectures d'interrogateurs), afin d'élargir les gammes de dose et de débits de dose accessibles. Ainsi, récemment, l'UJM a coordonné le projet LUMINA ayant permis de développer un dosimètre à fibre optique installé dans la station spatiale internationale par Thomas Pesquet [6]. Celui-ci permet de mesurer de très faibles doses de radiations, typiquement en dessous du  $\mu\text{Gy}$  (100  $\mu\text{rad}$ ). Ces technologies doivent permettre de développer des moyens in situ de caractérisation des faisceaux continus ou pulsés de photons, neutrons ou d'électrons, ce qui permettrait de nouveaux diagnostics dosimétriques autour de générateurs pulsés de rayonnement photonique ou électronique.

Le principal objectif de la thèse sera d'identifier et de valider les concepts pour un ou plusieurs capteurs à fibres permettant la caractérisation in situ (flux, fluence, homogénéité spatiale) des installations du CEA. Les faisceaux à caractériser sont assez différents en termes de types, flux de particules (photons, neutrons, électrons), profils temporels (continus, pulsés) et gammes énergétiques. On s'intéressera notamment à différents moyens d'irradiation du CEA : ORIATRON en mode photon et électron et ASTERIX générant des photons pulsés (tous deux au CEA GRAMAT), ainsi que NENUPHAR produisant des neutrons et ELSA en mode photon et électron (tous deux au CEA DIF).

L'un des objectifs de la thèse sera également de concevoir un ou plusieurs détecteurs qui pourront être utilisés pour la caractérisation d'installations expérimentales alternatives ou complémentaires de celles disponibles au CEA et de celles habituellement utilisées pour l'étude de la vulnérabilité et la qualification des composants électroniques en environnement radiatif. Un effort particulier sera mené pour discriminer les différents types de particules dans un environnement donné, en fonction de la réponse à chaque type d'interactions (par exemple discrimination neutron-photon).

Les objectifs scientifiques de la thèse sont complémentaires et visent à l'optimisation de ces dosimètres par une approche composant. La réalisation des tâches suivantes est visée:

- Combiner des études expérimentales et des simulations de type Monte-Carlo (Geant4) en vue d'améliorer les performances dosimétriques des capteurs RIA ou RIE à fibres optiques pour les environnements les plus complexes (mixtes gamma-neutrons, pulsés...). L'objectif sera en particulier, pour les fibres optiques les plus pertinentes, de déterminer leur calibration pour les différents environnements radiatifs d'intérêt à partir d'un ensemble limité de données expérimentales.
- Définir, via cette approche couplée, des structures originales de fibres optiques ou de composants à fibres optiques, permettant de réaliser de nouvelles fonctions dosimétriques telles que la discrimination gamma neutron. Ceci pourra être réalisé en simulant différentes architectures de fibres optiques (dopage, ...) ou différents conditionnements des fibres optiques (choisis par exemple pour exacerber la sensibilité à un type de particules).
- Caractériser les performances des dosimètres au sein des installations des partenaires (installations CEA DAM, DIF et Gramat, machines X de l'UJM, collaborations externes). Comparer leurs performances à celles de dosimètres de référence. Un effort particulier sera mené en vue de l'amélioration de la répétabilité des mesures, en travaillant sur la chaîne de mesure complète.



## Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant

Le doctorant aura la possibilité de publier les résultats issus de ses travaux de thèse dans des revues internationales à comité de lecture et de participer à des congrès scientifiques nationaux et internationaux.

## Profil et compétences recherchés

- Le profil recherché est celui d'un titulaire d'un master ou d'un diplôme d'ingénieur dans les domaines de la microélectronique, l'optoélectronique et de la photonique, de l'instrumentation nucléaire ou de la physique des grands instruments
- Les compétences de premier plan recherchées sont l'instrumentation, l'optoélectronique. De bonnes compétences en programmation scientifique sont également nécessaires.

## Références

- [1] S. Girard, et al., "Radiation Effects on Silica-based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.60, n°3, pp. 2015 - 2036, 2013. DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464.
- [2] S. Girard, et al., "Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications", Journal of Optics, vol. 20, issue 9, article number # 093001, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/aad271>
- [3] D. Di Francesca, et al., "Distributed Optical Fiber Radiation Sensing in the Proton Synchrotron Booster at CERN", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 65, no. 8, pp. 1639-1644, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TNS.2018.2818760
- [4] J. Vidalot et al., "Monitoring of Ultra-High Dose Rate Pulsed X-ray Facilities with Radioluminescent Nitrogen-Doped Optical Fiber", Sensors. 2022; 22(9):3192. <https://doi.org/10.3390/s22093192>
- [5] D. Söderström, et al., "Radioluminescence Response of Ce-, Cu-, and Gd-doped Silica Glasses for Dosimetry of Pulsed Electron Beams" Sensors.; 21(22):7523, 2021 <https://doi.org/10.3390/s21227523>
- [6] <https://missionalpha.cnes.fr/fr/lumina-top-depart-pour-la-mesure-des-radiations-dans-liss>



PhD thesis  
**Advanced Architectures of Fiber-based Dosimeters**

**Doctoral School:** EDSIS 488 (université de Saint-Etienne)

**Supervisors:**

Prof. Sylvain Girard, [sylvain.girard@univ-st-etienne.fr](mailto:sylvain.girard@univ-st-etienne.fr) , +33 (0)477915812

Dr-HDR Philippe Paillet, [philippe.paillet@cea.fr](mailto:philippe.paillet@cea.fr) , +33 (0)169265089

**Location :** CEA DAM Ile de France, 91290, Arpajon

**French or European nationality required**

**Context-** Detailed characterization of radiation environments in terms of dose (fluence) and dose rate (flux) remains essential to study the vulnerability or hardening of the various technologies - microelectronics, photonics, materials - that have to operate in these extreme environments. These environments, from the various nuclear fields (space, military, medicine, accelerators, dismantling, fusion, fission, storage), very often combine these radiative constraints with other environmental constraints such as electromagnetic, thermal or chemical perturbations. While numerous technologies exist for measuring dose and dose rates, one based on the use of radiosensitive fibers is of increasing interest. Silica-based fiber optic sensors can indeed exploit two radiation-related effects in glasses: Radiation-Induced Attenuation (RIA) and Radiation-Induced Emission (RIE), to provide real-time monitoring of irradiation parameters [1,2]. This type of sensor has the following advantages:

- Optical fibers are very small, with a core corresponding to the sensitive volume having a diameter of just a few microns, limiting the impact of the sensor and opening the way to micro-dosimetry. Being made of a dielectric, they are intrinsically immune to most electromagnetic perturbations.
- Optical fibers are mainly sensitive to ionization effects, whether direct or secondary, and can therefore detect the dose deposited by different types of particles: protons, electrons, neutrons and photons. Today, however, they cannot discriminate between different particle types or energies.
- Fiber optic dosimeters based on RIA provide a 1D map of the dose deposited along an optical fiber. Such a dosimeter is currently being implemented at CERN on the basis of studies carried out in collaboration with UJM [3]. These systems can monitor doses down to levels of the order of 100krad (1kGy).
- Fiber-optic dosimeters based on RIE enable real-time monitoring of radiation dose rates. Recent work, stemming from a previous thesis at CEA DAM, has shown that the response of such dosimeters is linear over more than twelve decades of dose rates [4], which is very interesting for environments with high radiation fluxes such as those encountered in fusion or proton therapy. Preliminary studies have demonstrated their ability to characterize pulsed beams too [4,5].

**Doctoral project –** Many studies are in progress in this research domain, in particular with UJM and its partners. Their main objective is to optimize sensors through a material approach (new types of optical fibers) or a system approach (new interrogator architectures), in order to broaden the accessible dose ranges and dose rates. For example, UJM recently coordinated the LUMINA project, which developed a fiber-optic dosimeter installed on the International



Space Station by Thomas Pesquet [6]. This enables the measurement of very low radiation doses, typically below  $\mu\text{Gy}$  (100  $\mu\text{rad}$ ). These technologies should make it possible to develop in situ means of characterizing continuous or pulsed photon, neutron or electron beams, enabling new dose diagnostics around pulsed photon or electron radiation generators.

The main objective of the PhD thesis will be to identify and validate concepts for one or more fiber sensors for in situ characterization (flux, fluence, spatial homogeneity) of CEA facilities. The beams to be characterized are quite diverse in terms of type, particle flux (photons, neutrons, electrons), temporal profile (continuous, pulsed) and energy range. Various CEA irradiation facilities will be used: ORIATRON in photon and electron mode and ASTERIX generating pulsed photons (both at CEA GRAMAT), as well as NENUPHAR producing neutrons and ELSA in photon and electron mode (both at CEA DIF).

One of the aims of the thesis will also be to design one or more detectors that can be used to characterize experimental facilities that are alternative or complementary to those available at CEA and those usually used to study the vulnerability and qualification of electronic components in a radiation environment. A particular effort will be made to discriminate between different types of particles in a given environment, depending on the response to each type of interaction (e.g. neutron-photon discrimination).

The scientific objectives of the thesis are complementary and aim to optimize these dosimeters using a component approach. The following tasks will be carried out:

- Combine experimental studies and Monte-Carlo simulations (Geant4) to improve the dosimetric performance of fiber optic RIA or RIE sensors for the most complex environments (mixed gamma-neutrons, pulsed...). In particular, for the most relevant optical fibers, the aim will be to determine their calibration for the various radiative environments of interest, based on a limited set of experimental data.
- Using this coupled approach, define original structures for optical fibers or fiber-optic components, enabling new dosimetric functions such as gamma-neutron discrimination. This could be achieved by simulating different optical fiber architectures (doping, etc.) or different optical fiber packaging (chosen, for example, to enhance sensitivity to a particular type of particle).
- Characterize dosimeter performance within partner facilities (CEA DAM, DIF and Gramat facilities, UJM X-ray machines, external collaborations). Compare their performance with that of reference dosimeters. A special effort will be made to improve measurement repeatability, by working on the complete measurement chain.

**The scientific objectives of the thesis are complementary and aimed at optimizing the PhD student's research work.**

The doctoral student will have the opportunity to publish the results of his or her thesis work in international peer-reviewed journals, and to take part in national and international scientific conferences.

### **Profile and skills required**

- Master's degree or engineering diploma in microelectronics, optoelectronics and photonics, nuclear instrumentation or physics of large instruments.



- Main skills sought are in instrumentation and optoelectronics. Good scientific programming skills are also required.

## References

- [1] S. Girard, et al., "Radiation Effects on Silica-based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.60, n°3, pp. 2015 - 2036, 2013. DOI: 10.1109/TNS.2012.2235464.
- [2] S. Girard, et al., "Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications", Journal of Optics, vol. 20, issue 9, article number # 093001, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/aad271>
- [3] D. Di Francesca, et al., "Distributed Optical Fiber Radiation Sensing in the Proton Synchrotron Booster at CERN", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 65, no. 8, pp. 1639-1644, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TNS.2018.2818760
- [4] J. Vidalot et al., "Monitoring of Ultra-High Dose Rate Pulsed X-ray Facilities with Radioluminescent Nitrogen-Doped Optical Fiber", Sensors. 2022; 22(9):3192. <https://doi.org/10.3390/s22093192>
- [5] D. Söderström, et al., "Radioluminescence Response of Ce-, Cu-, and Gd-doped Silica Glasses for Dosimetry of Pulsed Electron Beams" Sensors.; 21(22):7523, 2021 <https://doi.org/10.3390/s21227523>
- [6] <https://missionalpha.cnes.fr/fr/lumina-top-depart-pour-la-mesure-des-radiations-dans-liss>