

SESSION POSTERS

Salle Bouvine

Mercredi 3 avril 13h15 - 14h30

Jeudi 4 avril 13h15 - 14h30

Doctorants de 1^{re} année

PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

> UNITÉ DE RECHERCHE EN ENVIRONNEMENT

Mehana ALLACHE - Impact of chemical transients on the swelling and self-sealing of a damaged clay rock.

Hugo CARREIRA - Caractérisation des complexes uranium-matière organique naturelle et leur degré de labilité dans les eaux, par mesure de fluorescence et DGT.

Hugo DURAND - Une approche interdisciplinaire de la gestion post-accidentelle de l'environnement marin soumis à une contamination radioactive.

Sarah ELIE - Altération de la fonction mitochondriale : impact épigénétique des expositions chroniques au rayonnement ionisant lors du développement embryonnaire.

Amayes GASTON-BELLEGARDE - Mise en place d'une nouvelle méthode en vue de l'analyse ³⁶Cl à bas niveau.

Jérémy MARÉCHAL - Développement d'une méthode analytique rapide pour la mesure de radionucléides par ablation-laser-ICP-MS/MS.

Clara NALDESI - Impact of climate change on the frequency and intensity of extreme weather events and their combinations in France.

Enida NUSHI - Iodine fate in atmospheric droplets: heterogeneous reactivity and role of interface.

Fructueux Jésusgnon SOHOUNME - Étude expérimentale et numérique du comportement chimie mécanique d'un matériau cimentaire soumis à une dégradation millénaire, application aux ciments hydrauliques romains.

Hongyi SU - Near-fault ground motion prediction, site effects and wave propagation at regional scale for a shallow earthquake in southeastern France.

Juliette THOMAS - Les fosses de la Manche : héritage structural, réactivation tectonique cénozoïque et évolution quaternaire.

SUJET DE LA THÈSE

**Impact of chemical transients on the swelling
and self-sealing of a damaged clay rock**

Doctorant :	Mehana ALLACHE
Date du début de la thèse :	20/11/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Nadia MOKNI
Direction de la thèse :	Yu-Jun CUI/École des Ponts
École doctorale :	École doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE) – ED 531
Financement de la thèse :	IRSN

In many countries, deep geological repositories have been considered for the long term disposal of high or intermediate level and long-lived radioactive waste. In general, a multi-barrier system is adopted which is embedded in a clay rock that acts as a geological barrier, due to its low hydraulic conductivity and high sorption capacity for most radionuclides (Andra, 2005). The perturbation due to the excavation of disposal galleries, access shaft and ramps, will generate an Excavation Damaged Zone (EDZ) in the surrounding host rock, which can act as preferential pathways for the migration of radionuclides. It is known that the EDZ is able to recover its initial properties over time by self-sealing, thanks to the re-saturation by underground water seepage. However, during the operational phase of the repository, the degradation of the massive concrete components, will act as a source of alkaline plumes. The pH of the underground water, initially at 7.5, is expected to increase up to 13.5, further affecting the hydro-mechanical properties of the host rock.

In 2020, IRSN launched a research program to investigate the effect of concentrated saline and alkaline solutions on the mechanical and transport properties of a damaged clay host rock (OPAlinus clay) (Barakat, 2023). The results provided a first insight into the effect of alkaline plumes on EDZ self-sealing; however, several aspects would value additional investigations, especially on the role of microstructural and retention properties changes on the self-sealing and permeability evolution of the damaged material.

The aim of this work is to determine the impact of the chemical, mechanical and hydraulic transient perturbations caused by high pH alkaline plumes on the self-sealing behavior, swelling and permeability of the Callovo Oxfordian (COx) host rock. Laboratory self-sealing experiments will be carried out on cracked samples as analogues of a damaged clay rock from the EDZ and under various chemical, mechanical and hydraulic conditions. Permeability tests will be launched using a new cell developed by Barakat (2023).

At the microscopic scale, the self-sealing process will be monitored through X-ray computed tomography using a new CT scan Xray-transparent cell developed by Barakat (2023). The same testing protocol developed in Barakat (2023) will be adopted. It will consist in performing regular micro-CT scans upon samples exposed to alkaline solutions at different pH values.

Finally, analyses will be performed to determine microstructural changes on tested sample after dismantling (by petrophysical measurements including mercury intrusion porosimetry, nitrogen adsorption, etc.).

Mots clés : damaged clay rock, self-sealing, swelling, permeability, Callovo Oxfordian clay.

SUJET DE LA THÈSE

**Caractérisation des complexes uranium-matière organique naturelle
et leur degré de labilité dans les eaux, par mesure de fluorescence et DGT**

Doctorant :	Hugo CARREIRA
Date du début de la thèse :	05/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LT2S
Référent IRSN de la thèse :	Laureline FEVRIER
Direction de la thèse :	Frédéric COPPIN/IRSN
École doctorale :	Université de Toulon - École doctorale mer et sciences - ED 548
Financement de la thèse :	IRSN

Cette thèse a pour but de répondre aux objectifs fixés dans la note d'orientations fédératrices « Ambitions de l'IRSN dans le domaine des transferts des radionucléides dans l'environnement », dont le champ d'application concerne la caractérisation des transferts (dispersion, dépôts, fixation, remobilisation par des phénomènes naturels ou anthropogéniques) des radionucléides et des toxiques chimiques dans les différents compartiments de l'environnement. Le sujet s'inscrit en particulier dans l'axe visant à « Comblent les lacunes de connaissances intéressant les mécanismes clés de transfert des radionucléides dans l'environnement », en apportant des connaissances nouvelles sur la spéciation de l'uranium (U) en milieu aqueux en présence de matière organique dissoute (MOD) qui, malgré les nombreuses études portant sur l'U, reste encore peu connue à ce jour. Pour autant la complexation U-MOD reste un phénomène important à prendre en compte car elle influence de manière non négligeable les transferts d'U dans les différents compartiments de l'environnement. Les connaissances apportées par la thèse seront à la fois qualitatives, avec une identification des complexes U-MOD, mais également quantitatives avec la détermination des constantes apparentes de complexation et la quantification de la labilité (i.e. de la capacité à se dissocier) de ces complexes.

Le déroulé de la thèse se fera suivant les deux objectifs précédemment cités. Dans un premier temps la caractérisation des complexes U-MOD se fera par spectrofluorimétrie couplée avec de la simulation géochimique (Vminteq, Jchess, WHAM, PHREEQC) pour différents types de MOD modèles. La simulation géochimique permettra de définir précisément la spéciation de l'U en solution dans les différentes conditions étudiées avant mise en contact avec la MOD. La MOD mise en contact avec l'U présente en spectrofluorimétrie un phénomène dit de quenching de fluorescence qui se traduit par une diminution de sa fluorescence avec l'augmentation de la concentration d'U. L'analyse de ce quenching permettra de déterminer les constantes apparentes de complexation des différents complexes U-MOD. Dans un second temps la mesure de labilité sera obtenue par utilisation de capteurs passifs de type DGT (Diffusive Gradient in Thin films). Ces capteurs, qui piègent l'U sur une résine chélatante, induisent une dissociation des complexes d'U présents dans le milieu d'exposition, fonction du pouvoir chélatant de la résine utilisée et de la stabilité des complexes d'U. L'analyse de la quantité d'U accumulé sur la résine du DGT exposé aux complexes U-MOD précédemment caractérisés permettra ainsi de déterminer leur constante de labilité.

Mots clés : uranium, MOD, fluorescence, DGT.

SUJET DE LA THÈSE

**Une approche interdisciplinaire de la gestion post-accidentelle de l'environnement marin
soumis à une contamination radioactive**

Doctorant :	Hugo DURAND
Date du début de la thèse :	12/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SRTE/LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Olivier RADAKOVITCH
Direction de la thèse :	Olivier RADAKOVITCH/IRSN & Sophie GAMBARELLA/AMU
École doctorale :	AMU - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN & Bourse AMU

L'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins militaires, civiles ou de recherches nécessite de disposer d'installations réglementées. Au cours de cette dernière décennie, ces installations se sont multipliées, et le récent plan de relance du nucléaire tend encore à en augmenter le nombre. Les risques sanitaires et écologiques en cas de rejets de substances radioactives dans l'environnement perdurent donc, et ils restent nécessaire d'anticiper les conséquences d'un accident nucléaire, et d'élaborer en amont une stratégie de gestion étalée dans le temps. En 2022, le gouvernement français a repris sa doctrine de gestion post-accidentelle pour les territoires contaminés à la suite d'un accident nucléaire. Cette version souligne la nécessité de poursuivre de nouveaux objectifs pour compléter ces propositions, l'un d'entre eux concerne la gestion pour les milieux marins. En effet, de nombreuses installations nucléaires sont à proximité des milieux aquatiques, et le risque d'un rejet de radionucléides sur ou dans ces milieux risque d'affecter l'océan. Le retour d'expérience de la gestion des conséquences de l'accident de Fukushima illustre le besoin de disposer d'éléments de doctrine à ce sujet. En réponse à ce besoin, le comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle (CODIRPA), piloté par l'Autorité de Sûreté Nucléaire, a validé la création d'un groupe de travail pluraliste supervisé par l'IRSN pour proposer au gouvernement des éléments de doctrines pour la gestion des milieux aquatiques, et plus particulièrement sur la gestion du milieu marin.

Les objectifs de cette thèse s'inscrivent dans cette réflexion, en proposant de comparer différents scénarios accidentels de dispersion marine de radionucléides sous formes dissoutes soumis à différentes contraintes hydrodynamiques, et de développer une méthode d'évaluation des risques pour les populations et l'environnement. Le modèle IRSN de dispersion marine (STERNE) sera utilisé, et nous fonderons nos réflexions autour des risques sur la base d'indicateurs ou de critères à définir de protection de la population contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants. Nous pourrions aussi étudier la question de l'impact socio-économique au travers notamment de la pêche professionnelle et du tourisme. Enfin au regard des multiples conventions internationales, du droit de la mer et des différents instruments juridiques concernant le droit nucléaire à l'international, à l'échelle européenne puis nationale, nous étudierons les processus juridiques encadrant les questions que soulève la gestion de la phase post-accidentelle, notamment dans les cas de pollutions transfrontalières.

Mots clés : radionucléides, contamination, évaluation des risques, zone côtière, juridiction.

SUJET DE LA THÈSE

Altération de la fonction mitochondriale : impact épigénétique des expositions chroniques au rayonnement ionisant lors du développement embryonnaire

Doctorante :	Sarah ELIE
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SERPEN / LECO
Réfèrent IRSN de la thèse :	Olivier ARMANT
Direction de la thèse :	Olivier ARMANT / IRSN & Jimenez chillaron JOSEP / Universitat de Barcelona
École doctorale :	Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN

De nombreux écosystèmes terrestres et aquatiques sont vulnérables aux rayonnements ionisants (RI) lors de catastrophes nucléaires et subissent des expositions chroniques. Des études ont démontré que les mitochondries, des organelles impliquées dans le métabolisme énergétique des cellules, sont sensibles à l'augmentation du stress oxydatif intracellulaire, et pourraient être ainsi une cible privilégiée des RI. Les mitochondries sont aussi impliquées dans plusieurs maladies ayant des impacts neurodéveloppementaux.

Ce projet de thèse porte sur l'étude des impacts des expositions chroniques à faible dose de RI sur les mitochondries du poisson zèbre, lors de son développement embryonnaire (5 jours), et sur l'héritabilité des impacts de parents irradiés aux embryons. Les faibles doses sont définies par des doses de 0,5 mGy/h à 5mGy/h (niveau de référence pour les poissons, ICRP).

Le poisson zèbre est une espèce modèle très utilisée en écotoxicologie, en génétique, et en biomédicale, pour étudier les impacts des pollutions sur les êtres vivants et les écosystèmes aquatiques. Cette espèce possède de nombreux avantages à son utilisation, comme la transparence de ses embryons, et la connaissance de son génome. Le développement embryonnaire est une étape clé dans la vie des animaux vertébrés, et est aussi une phase très sensible aux expositions aux RI.

Dans une première étude en 2024, les œufs fertilisés seront exposés dans l'irradiateur MICADO aux RI de manière continue jusqu'à cinq jours de développement à des débits de doses de 0,5mGy/h, 1 mGy/h, 2 mGy/h et 5 mGy/h. Des effets sur la motilité en lien avec des perturbations neuromusculaires ont été précédemment retrouvés pour ces doses. Des tests sur la fonction et la morphologie du réseau mitochondrial seront évalués et mis en relation avec des paramètres physiologiques comme l'augmentation du stress oxydant, le nombre de mutations, et le comportement des larves. Dans une deuxième phase (2025), les impacts héritables possiblement médiés par les mitochondries (organelles transmises de manière maternelle) seront évalués sur une génération en irradiant des adultes à faible dose pendant 35 jours (gamétogenèse), puis en réalisant des reproductions pour obtenir la génération F1. Les effets sur les gonades femelles et les embryons F1 (5 jours après fécondation) seront évalués au niveau épigénétique (structure de la chromatine par ATAC-Seq) et mis en relation avec les modifications de la transcription (mRNAseq) et des impacts fonctionnels (comportement, analyse *in situ* par immunofluorescence, fonction mitochondriale).

Mots clés : poisson zèbre, altération mitochondrial, épigénétique, rayonnements gamma, héritabilité.

SUJET DE LA THÈSE

Mise en place d'une nouvelle méthode en vue de l'analyse ^{36}Cl à bas niveau

Doctorant :	Amayes GASTON-BELLEGARDE
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SAME/LERCA
Référent IRSN de la thèse :	Azza HABIBI
Direction de la thèse :	Pascal FICHET/CEA
École doctorale :	Sorbonne Université - Chimie physique et chimie analytique de Paris Centre - ED 388
Financement de la thèse :	IRSN

Le chlore ^{36}Cl est un isotope radioactif du chlore, émetteur bêta pur, ayant une période de $3,01 \times 10^5$ ans. Sa production anthropogénique est due au fonctionnement des centrales, aux rejets engendrés par les usines de traitement du combustible usé, aux sites de stockage des déchets nucléaires ainsi qu'au démantèlement des centrales. Le chlore est très volatil et mobile au sein des matrices biologiques avec une biodisponibilité élevée mais la quantification du ^{36}Cl , bien que primordiale, reste très compliquée. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la mission de surveillance radiologique de l'environnement et de sûreté nucléaire menée par l'IRSN ainsi que pour faire face à une importante problématique sanitaire tout en renforçant la qualité et l'expertise de l'IRSN en matière de risque radiologique. Cette étude est donc affiliée aux objectifs 1 et 4 de la COP 2019-2023 : « Apporter une expertise opérationnelle et proportionnée aux enjeux de sûreté nucléaire... » et « Mener une recherche... pour répondre aux besoins actuels et futurs de l'expertise ».

Actuellement, seule la spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) permet la mesure du ^{36}Cl avec des limites de détections (LD) compatibles avec les niveaux attendus. Cependant, l'AMS est un appareil coûteux et volumineux. Bien que la scintillation liquide constitue une alternative peu coûteuse, les LD qu'elle permet d'atteindre sont élevées. Toutefois, la spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) permet d'atteindre des LD compatibles avec les normes en vigueur pour plusieurs radionucléides. Cette technique est basée sur la discrimination des isotopes ionisés suivant leur rapport masse sur charge. La quantification du chlore en ICP-MS est complexe en raison de ses propriétés physico-chimiques, notamment son énergie d'ionisation trop élevée (12,97 eV). Un traitement chimique préalable à la mesure doit donc être développé et les conditions opératoires doivent être étudiées afin d'assurer la quantification du ^{36}Cl avec des LD compatibles avec les niveaux attendus.

L'objectif de la thèse est donc de développer et d'optimiser un protocole innovant de quantification du ^{36}Cl à bas niveau. Ce protocole sera composé d'un traitement chimique incluant une étape d'extraction du chlore par four à combustion et une étape de purification par chromatographie liquide, afin de minimiser la présence d'interférents tout en récupérant le chlore dans une matrice compatible avec sa quantification par ICP-MS. La mesure sera réalisée par ICP-MS/MS, technique qui permet de s'affranchir des interférents isobariques et polyatomiques grâce à la cellule de collision/réaction entourée par deux quadripôles.

Mots clés : chlore 36 , ICP, MS/MS, analyse.

SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une méthode analytique rapide pour la mesure de radionucléides
par ablation-laser-ICP-MS/MS

Doctorant :	Jérémy MARÉCHAL
Date du début de la thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SAME/LERCA
Référent IRSN de la thèse :	Hugo JAEGLER
Direction de la thèse :	Christophe PECHEYRAN / CNRS & Alkiviadis GOURGIOTIS / IRSN
École doctorale :	Université de Pau et des Pays de l'Adour - ED SEA - École doctorale sciences exactes et leurs applications (ED 211) - ED 211
Financement de la thèse :	IRSN

Dans le cadre de ses missions de surveillance radiologique environnementale, l'IRSN réalise des analyses de radioactivité autour des installations nucléaires. Actuellement le Service d'analyses et de métrologie de l'environnement (SAME) mesure les actinides (Th, U, Pu, Am, Cm) par différentes méthodes nécessitant des séparations radiochimiques (longues et coûteuses) afin de minimiser les interférences de mesure. Le SAME dispose de deux ICP-MS/MS qui ont la particularité de disposer de deux filtres de masse de type quadripolaire, entourant une cellule de collision-réaction permettant un meilleur contrôle des interférences spectrales. Dans le cadre de cette thèse, une collaboration a vu le jour avec SNRSI (*Singapour nuclear research safety initiative*), avec pour objectifs la mise au point d'une méthode permettant la mesure simultanée de ces actinides par ICP-MS/MS sans séparation radiochimique au préalable et le développement d'un couplage de l'ICP-MS/MS avec un module d'ablation laser. Cela permettrait d'allier les mesures rapides de l'ICP-MS/MS avec un échantillonnage directe grâce au laser. L'utilisation de l'ablation laser permettrait l'analyse directe de particules radioactives, en vue de leur caractérisation isotopique afin d'obtenir des informations sur leur origine, particule par particule. Ces développements répondent à l'objectif de recherche de haut niveau n°4 du COP 2019-2023. De même, les collaborations avec le CNRS et SNSRI répondent aux objectifs N°5 et 6 qui portent sur les collaborations nationales, internationales et avec le monde académique.

Dans un premier temps une étude bibliographique sur l'état de l'art de la mesure des actinides par ICP-MS/MS ainsi que sur les couplages LA-ICP-MS/MS a été initiée. Le premier objectif sera la mise en place d'une méthode de mesure des actinides en simultanée dans des échantillons liquides par ICP-MS/MS, en l'absence des étapes de traitements radiochimiques de l'échantillon. La méthode sera validée par la mesure d'échantillons environnementaux certifiés. Dans un second temps, un premier travail de collaboration avec le CNRS et l'université de Pau sera engagé à l'IPREM (Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux) pour la mise en place du couplage fsLA-ICP-MS/MS (ablation en régime femtoseconde). Lors de la collaboration avec SNRSI, après la mise en place du couplage LA-ICP-MS/MS dans leur laboratoire, des développements seront menés sur la mesure des actinides dans les échantillons solides de l'environnement (particules, aérosols prélevés sur filtres, végétaux...) dans le laboratoire de SNRSI. Les collaborations avec l'IPREM et SNSRI seront facilitées car les trois instituts disposent du même modèle d'ICP-MS/MS (Agilent 8900).

Mots clés : LA ICP MS/MS, actinides, analyse particulaire, isotopie.

SUJET DE LA THÈSE

Impact of climate change on the frequency and intensity of extreme weather events and their combinations in France

Doctorante :	Clara NALDESI
Date du début de la thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Référent IRSN de la thèse :	Nathalie BERTRAND
Direction de la thèse :	Mathieu VRAC / LSCE
École doctorale :	Sorbonne université - Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France - ED 129
Financement de la thèse :	IRSN

This thesis is part of the framework of question 2 of the IRSN scientific strategy "How to better characterize and model the stresses generated on the installation by internal and external solicitations or aggressions (including natural ones) which could impact safety?" and is related to Issue 6 of the Research Thematic Group on natural risks which is "Defining strategies for the statistical evaluation of extreme hydrometeorological hazards".

The latest IPCC report states that anthropogenic climate change (ACC) is already affecting the frequency and intensity of many extreme weather events across the globe. ACC changes in extreme weather events have critical impacts on our society, going from food and water instability to increased human mortality. In urban areas, energy systems have been compromised by extreme events resulting in negative social impacts and disruptions. Therefore, it becomes very important to identify the change in the intensity and frequency of extreme events due to ACC to ensure future energy production. This thesis work focuses on the characterisation of the meteorological hazards to be taken into account in nuclear safety.

The research will be organised into three parts. The first will involve the creation of a catalogue of different weather events that significantly impacted nuclear facilities in France over the past 50 years. To do so, the IRSN PIREX tool will be used: a platform that collects significant events of all kinds declared by facilities operators. For each event identified, a characterisation of the associated meteorological variables will be carried out to describe the weather conditions under which the various extreme events occur. Then, it will be assessed to what extent ACC made the identified events more or less intense or likely. This part relates to attribution, a subfield of climate sciences that seeks to estimate how much ACC has affected the magnitude or probability of individual extremes. The analogues methodology developed by Yiou et al. 2007 and Faranda et al. 2022 will be applied, which focuses on the dynamics associated with the events. This technique identifies similar circulation patterns and enables to evaluate significant evolutions over time and associate them with ACC. In the third part, the future evolution of the selected events in different emission scenarios will be studied, adapting the analogues methodology to apply it to climate simulations. This analysis will explore the hazards that facilities will be exposed to in the future depending on the level of global warming.

Mots clés : extreme weather events, attribution, extreme hydrometeorological hazard, nuclear safety.

SUJET DE LA THÈSE

Iodine fate in atmospheric droplets: heterogeneous reactivity
and role of interface

Doctorante :	Enida NUSHI
Date du début de la thèse :	09/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Anne-Cécile GREGOIRE
Direction de la thèse :	Sophie SOBANSKA/Université de Bordeaux & Anne-Cécile GREGOIRE/IRSN
École doctorale :	Université de Bordeaux - École doctorale des sciences chimiques - ED 40
Financement de la thèse :	IRSN

In case of an accident or incident at a nuclear facility, gaseous radioiodine can be released into the atmosphere. The knowledge of its reactivity is a key issue to predict its dispersion for efficient accident management plans. Indeed, altering the chemical speciation and physical form of iodine compounds carries implications for the transportation of iodine in the atmosphere and its impact on human health. Presently, the atmospheric dispersion models for iodine do not consider its heterogeneous reactivity with aqueous atmospheric particles. Within the context of improving the atmospheric dispersion model of radioactive iodine, this collaborative PhD project between IRSN (Cadarache) and Institute of Molecular Sciences ISM (Bordeaux) aims to contribute to the understanding of atmospheric iodine chemistry through experimental approaches. The focus lies on interaction between gaseous inorganic iodine (I_2 and HOI) and atmospheric droplets.

At IRSN, laboratory experiments will focus on determination of uptake rate of I_2 and HOI by aqueous droplets. The droplet train technique, commonly used for uptake rate determination, will be applied. To the best of our knowledge, iodine species' uptake coefficients have not been previously assessed using this method. Iodine uptake on pure water will be firstly considered and compounds, representatives of organic and inorganic loads of atmospheric droplets will be added. The influence of the particle size (70 to 150 μm diameter) on the uptake of the gas phase will be studied since, by definition, the uptake rates vary with the variation of the droplet surface. Parameters affecting iodine uptake and its reactivity will be determined. The setup, currently under construction at IRSN, will be specifically designed for this purpose. A special attention will be brought on detection techniques (ICP MS) to monitor the reactant and products concentration at low level of detection.

At ISM, the physico-chemical evolution of individual particles exposed to gaseous iodine species will be investigated using acoustic levitation set up. This single-particle technique coupled with an optical camera and a Raman microspectrometer will allow for real-time, in-situ characterization of size and chemical composition of individual droplets. Photochemical aging of the exposed droplets will be also investigated.

This research addresses the scientific challenge of the analysis of heterogeneous iodine-droplet interactions. Special attention will be given to the in-situ generation of HOI in the gas phase. This institutional collaboration will enhance the comprehensive investigation of atmospheric iodine chemistry, providing valuable experimental data for refining the dispersion model in nuclear safety assessments.

Mots clés : gaseous inorganic iodine, heterogeneous reactivity, nuclear safety, atmospheric droplets, atmospheric chemistry.

SUJET DE LA THÈSE

**Étude expérimentale et numérique du comportement chimie mécanique
d'un matériau cimentaire soumis à une dégradation millénaire,
application aux ciments hydrauliques romains**

Doctorant :	Fructueux Jé Sugnon SOHOUNME
Date du début de la thèse :	13/11/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Mejdi NEJI
Direction de la thèse :	Alexandre DAUZERES/IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Sciences chimiques : molécules, matériaux, instrumentation et biosystèmes - ED 571
Financement de la thèse :	IRSN

Les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire pour le conditionnement et le stockage des déchets radioactifs. Leur ouvrabilité et leurs propriétés en font la classe de matériaux d'enrobage des déchets la plus répandue, en France comme à l'étranger. Les matériaux cimentaires sont aussi employés comme élément de structure des ouvrages des centres de stockage de déchets (CIGEO, CSA...). Ces matériaux sont soumis à des agressions couplées pouvant impacter leurs propriétés chimio-mécaniques : température, chimie du milieu environnant, interaction matrice/déchet, sollicitation mécanique et irradiation. Pour vérifier l'évolution à très long terme des colis et des ouvrages en béton, un certain nombre d'études sont lancées régulièrement par l'IRSN, pour nourrir une modélisation à long terme en soutien à l'expertise de sûreté. Cette approche s'appuie sur l'idée qu'avec une compréhension fine des mécanismes de dégradation à moyen terme, il doit être possible de modéliser le comportement à long terme. Du fait de la complexité d'obtenir des informations sur un béton centenaire voire millénaire, cette approche est largement employée par la communauté scientifique.

Cette thèse s'attache à étudier l'écart induit par cette approche en s'intéressant à un matériau cimentaire soumis à une dégradation pendant plusieurs milliers d'années.

Une modélisation chimie-transport sera ainsi développée à partir du code de transport réactif Hytec. La construction de ce modèle repose sur une campagne expérimentale en trois parties :

- La fabrication, la mise en dégradation dans de l'eau de mer et la caractérisation d'échantillons de mortier hydraulique romain en laboratoire.
- La caractérisation d'une carotte issue d'un bloc de mortier hydraulique romain fabriqué et immergé dans de l'eau de mer il y a 20 ans à Brindisi (Italie) dans le cadre du projet ROMACONS.
- La caractérisation d'une carotte issue d'une des piles de la structure portuaire de la baie de Misène (Italie) datant du 1^{er} siècle avant Jésus-Christ.



Pour chacune de ces étapes, les échantillons seront caractérisés via une approche multi-techniques (MEB-EDS, DRX, micro tomographie, nano/micro indentation...) afin de mettre en lumière les mécanismes de dégradation et ainsi alimenter le modèle numérique.

Mots clés : modélisation, béton romain, mécanique, chimie, durabilité.

Référence bibliographique

^[1] G. Coulon, J.-C. Golvin, LE GÉNIE MARITIME ROMAIN, Actes sud/Errance, 2020.

*Restitution théorique du chantier
de mise en œuvre du béton romain^[1]*

SUJET DE LA THÈSE

**Near-fault ground motion prediction, site effects and wave propagation at regional scale
for a shallow earthquake in southeastern France**

Doctorant :	Hongyi SU
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN
Référent IRSN de la thèse :	Sébastien HOK
Direction de la thèse :	Cécile CORNOU/Université Grenoble Alpes
École doctorale :	Université Grenoble-Alpes - Terre, Univers, Environnement - ED 105
Financement de la thèse :	IRSN

This thesis aims to improve seismic hazard assessment in south-eastern France by modelling near-fault ground motions for the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, the most damaging seismic event in France since 1967. The earthquake occurred near two nuclear power plants (NPP) in the Rhone Valley (Cruas and Tricastin) and resulted in significant damage at the epicentre despite its moderate magnitude. However, this event was only recorded from considerable distance. Generally, the absence of near-fault observations poses challenges in comprehending and calibrating ground motion prediction equations (GMPEs), especially in moderately seismic regions like Le Teil. Hence, the primary goal of this thesis is to develop a numerical simulation method that integrates fault rupture models, wave propagation, and the impacts of near-surface geology (site effects) to accurately simulate the seismic wavefield in the epicentral region. Furthermore, ground motions recorded at large distances reveal distinctive characteristics, such as rapid attenuation of high-frequency content (Laurendeau et al., submitted), which may be linked to the shallow source and regional geology. Our goal is to validate this hypothesis through our earthquake modelling efforts. These objectives align with the GTR Risques Naturels (ground motion prediction) and the IRSN/CNRS-INSU roadmap.

To address these scientific questions, we calculate synthetic ground motions using a virtual sensor array positioned both near the fault and further away. We will utilize both kinematic and dynamic modelling of fault rupture. Data-driven kinematic models explore various model parameters, while physics-based dynamic models generate near-fault ground motion and remove ambiguity by excluding implausible scenarios. Both approaches consider wave propagation and site effects by incorporating seismic properties of the medium. The combined modelling approach addresses uncertainties in fault rupture, site effects, and wave propagation, important for accurately simulating the level of ground motion. Although 3D dynamic models, such as the SeisSol code used in this thesis (Kaser and Dumbser, 2006), can be computationally intensive, we will leverage the high-performance computing infrastructure at TGCC (Très Grand Centre de Calcul du CEA). Validation of our approach will involve comparing simulated seismic waveforms, evaluating displaced objects in the epicentral area, and analysing seismic recordings from remote locations. This approach will allow to better assess key ingredients governing ground motion at local (near-field) and regional scales and will be helpful for a better assessment of seismic hazard in the area, including Cruas and Tricastin NPPs.

Mots clés : Le teil, modelling, site effects, wave propagation, SHA.

Les fosses de la Manche : héritage structural, réactivation tectonique cénozoïque et évolution quaternaire

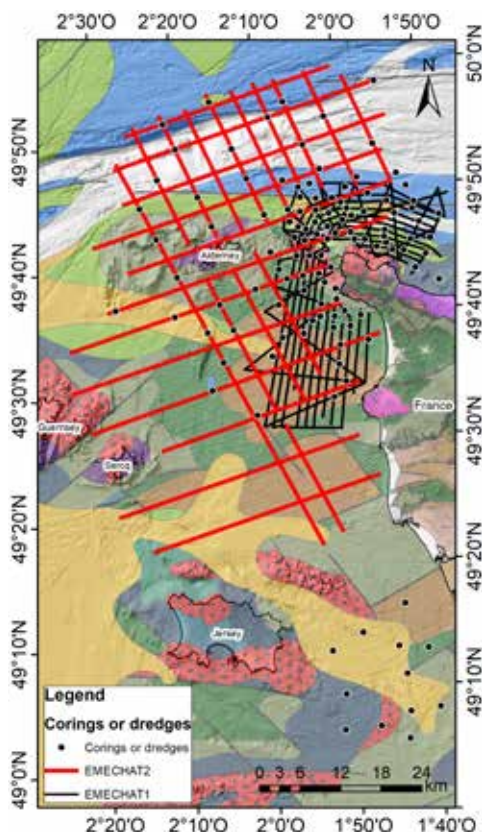
Doctorante :	Juliette THOMAS
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Référent IRSN de la thèse :	Stéphane BAIZE
Direction de la thèse :	David GRAINDORGE / Université de Brest & Anne DUPERRET / Université Le Havre Normandie
École doctorale :	Université Bretagne Loire - Sciences de la Mer et du Littoral (SML) - ED 598
Financement de la thèse :	IRSN & bourse ED

La péninsule du Cotentin est une zone d'intérêt pour l'Institut de Radioprotection de Sûreté Nucléaire (IRSN) en raison de la présence d'infrastructures sensibles telles que le CNPE et EPR de Flamanville et l'usine de retraitement de la Hague (ORANO Hague). Il est nécessaire d'évaluer l'aléa sismique dans cette région, en détaillant notamment les structures tectoniques récemment activées et leur relation avec les zones de cisaillement et failles anciennes du Massif armoricain, auquel appartient le Cotentin.

Dans la suite des études terre-mer menées dans la thèse de Tassadit Kaci (Univ. Le Havre Normandie), cette thèse se concentre en domaine marin au nord-ouest du Cotentin, comprenant la fosse des Casquets et la fosse de la Hague. L'objectif est de résoudre le puzzle du substrat géologique de la façade occidentale de la Manche dans sa dimension terre-mer, et les relations avec les remplissages sédimentaires récents des fosses citées. Le projet est d'obtenir une synthèse globale du système des fosses de la partie ouest de la Manche pour apporter un regard nouveau sur sa connexion avec les bâtis polygéniques adjacents et

l'évolution post-varisque. Cela permettra de clarifier le schéma tectonique récent, l'impact sur l'évolution du système sédimentaire et leurs conséquences. Ce projet s'inscrit dans la stratégie scientifique de l'IRSN visant à mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur les installations sensibles par des sollicitations naturelles externes d'ordre tectonique, qui pourraient impacter la sûreté nucléaire.

Pour répondre à la problématique, le travail est d'exploiter et de traiter les données sismiques et bathymétriques déjà acquises lors de la campagne offshore EMECHAT1 de juin 2022 sur la fosse de la Hague avec des données de sismique haute résolution complémentaires (figure 1). Une nouvelle campagne programmée en juin 2024 prévoit une extension jusqu'à la fosse centrale (EMECHAT2, figure 1), durant laquelle la sismique haute résolution sera complétée par des prélèvements ciblés au carottier-roche dans les formations géologiques imagées en sismique, qui pourront être calées stratigraphiquement. Parallèlement, les données disponibles sur la géologie des fosses seront compilées grâce à un partenariat avec l'Ifremer et le BRGM du côté français et une collaboration avec l'université d'Oxford côté anglais.



Mots clés : fosses, Manche, tectonique, géologie, Massif armoricain, Cotentin.

Salle Bovine

Mercredi 3 avril 13 h 15 - 14 h 30

Jeudi 4 avril 13 h 15 - 14 h 30

Doctorants de 1^{re} année

PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

> UNITÉ DE RECHERCHE EN SANTÉ

Thomas BECK - Utilisation de mesures d'hétérogénéité de la réponse vasculaire pour prédire le risque de complications aux tissus sains après radiothérapie : impact du débit de dose.

Calixte COTTINEAU - Effet de l'irradiation sur la symbiose « microbiote et système immunitaire de l'hôte » au sein de l'écosystème colique : Impact de l'alimentation comme stratégie thérapeutique.

Clémence FINET - Rôle de l'inflammation et de l'autophagie dans la réponse cellulaire à une exposition à faible dose d'uranium sur un modèle organoïde rénal et sa comparaison *in vivo* chez la souris.

Thin Hinan NABET - Impact de l'âge sur les effets cardiovasculaires à long terme après une exposition externe à de faibles doses de Césium 137.

Léa OULD BOUKHITINE - Étude de l'effet d'une exposition externe aiguë à des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants, associée ou non à un facteur de risque vasculaire, sur la microvascularisation cérébrale et cardiaque chez la souris.

Honoré RAHARIVELONARIVO - Effets multigénérationnels d'une exposition intra-utérine à faibles doses et faibles débits de doses de rayonnements ionisants.

Alban ROUSSEL - Caractérisation dosimétrique et radiopathologique des lésions radio-induites lors de surexpositions accidentelles aux rayons X de basses énergies : impact du volume, de la localisation et de la qualité du rayonnement.

Justine SAUCE - Analyse statistique des associations entre expositions multiples aux rayonnements ionisants et à d'autres facteurs de risques et pathologies chroniques dans la cohorte CONSTANCES.

SUJET DE LA THÈSE

Utilisation de mesures d'hétérogénéité de la réponse vasculaire pour prédire le risque de complications aux tissus sains après radiothérapie : impact du débit de dose

Doctorant :	Thomas BECK
Date du début de la thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SERAMED/LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Vincent PAGET
Direction de la thèse :	Fabien MILLIAT/IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Cancérologie, Biologie, Médecine, Santé - ED 582
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

En radiobiologie, la comparaison des effets de deux rayonnements ionisants (RI) est réalisée par la mesure de l'efficacité biologique relative (EBR). Historiquement basée sur le test de survie clonogénique, celle-ci apparaît insuffisante pour prédire le devenir des cellules irradiées. En effet, l'évolution technologique des accélérateurs linéaires médicaux (LINAC) permet de délivrer des RI à des énergies et des débits de doses de plus en plus élevés. Cependant, le recul clinique et les connaissances des effets à long terme de ces nouvelles modalités sur les tissus sains sont peu connus. Les radiothérapeutes extrapolent ainsi la valeur d'EBR des photons à 1 quelle que soit l'énergie et /ou le débit de dose utilisé. Or, différents travaux du laboratoire ont démontré que les RI engendrent des changements phénotypiques hétérogènes et que les cellules endothéliales (CE) jouent un rôle clé dans les dommages tissulaires radio-induits. Ce projet de thèse consiste à étudier l'hétérogénéité de la réponse vasculaire pour prédire le risque de complications aux tissus sains après radiothérapie en se focalisant sur l'impact du débit de dose du rayonnement utilisé. Il participe ainsi à répondre à la question n°5 de la stratégie scientifique de l'IRSN visant à mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des RI à des fins de diagnostiques et thérapeutiques. Enfin, ce projet s'inscrit dans les ambitions de l'IRSN en matière de recherche et développement pour une utilisation sûre et optimisée des RI en médecine, visant à permettre l'identification, la compréhension et l'évaluation du risque de complications des radiothérapies.

Afin d'investiguer ces différents phénotypes, un panel « EBR-multiparamétrique » de cytométrie en flux spectrale comprenant 2 critères morphologiques et 14 marquages fluorescents variants avec l'irradiation sera utilisé. Les mesures d'hétérogénéité de la réponse d'un modèle in vitro de CE humaines (HUVECs) ainsi que celles d'un modèle in vivo chez la souris reproduisant une fibrose radique pulmonaire tardive seront analysées. Le LINAC de l'IRSN ainsi que l'irradiateur FLASH de l'Institut Gustave Roussy seront utilisés pour tester différentes modalités d'irradiations conventionnelles et non-conventionnelles en photon et en électron. Les données mesurées seront ensuite analysées et modélisées avec des outils mathématiques et bio-informatiques de réduction de dimensions (UMAP) ainsi qu'avec des calculs de trajectoires, techniques utilisées en single-cell RNA-Sequencing. Ces analyses permettront notamment de pouvoir comparer différentes modalités d'irradiation, d'établir des liens entre les réponses mesurées sur les différents modèles et d'identifier les marqueurs expliquant l'orientation de l'hétérogénéité.

Mots clés : radiothérapie, débit de dose, tissu sain.

SUJET DE LA THÈSE

**Effet de l'irradiation sur la symbiose « microbiote et système immunitaire de l'hôte »
au sein de l'écosystème colique :
impact de l'alimentation comme stratégie thérapeutique**

Doctorant :	Calixte COTTINEAU
Date du début de la thèse :	30/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SERAMED/LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Alexandra SEMONT
Direction de la thèse :	Fabien MILLIAT/IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay- Cancérologie, Biologie, Médecine, Santé - ED 582
Financement de la thèse :	IRSN

La radiothérapie externe est l'un des traitements incontournables dans la prise en charge des pathologies cancéreuses de la zone pelvienne (60% des patients). Cependant, avec cette méthode, il est inévitable que certains tissus sains localisés autour de la tumeur soient atteints. Cela entraîne des effets toxiques au niveau d'organes radiosensibles comme le côlon. Le traitement peut alors provoquer chez les patients des symptômes modérés à sévères, regroupés dans une même maladie, la « *Pelvic radiation disease* » ou PRD pour laquelle, il n'existe aucun traitement curatif. Le microbiote intestinal est l'un des facteurs clés du bon fonctionnement du tube digestif, notamment en modulant la réponse inflammatoire. Chez l'homme un lien entre état du microbiote après irradiation et effets secondaires liés au dysfonctionnement du tractus intestinal est suggéré. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'étudier les liens entre une modification de la symbiose « microbiote/système immunitaire » de l'hôte et l'altération radio-induite de la barrière épithéliale colique.

Ce projet de thèse s'intègre à l'un des questionnements scientifiques posé par l'IRSN dans le domaine de la radioprotection : « Comment mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques ? » (question numéro 5). Pour répondre à cet objectif, un modèle préclinique de PRD, i.e. ; d'irradiations fractionnées (3x10Gy ou 3x14Gy) de la zone colorectale des rats sera utilisé. Les différents points abordés seront :

- 1 - Une étude de l'influence du microbiote sur l'état de la barrière épithéliale colique après irradiation, en modulant le microbiote des animaux par l'administration de régimes alimentaires spécifiques afin de maintenir ou de rétablir l'état du microbiote. L'état de la barrière épithéliale colique sera évalué, in vivo sur coupes histologiques/immunohistochimiques et organoïdes 3D de côlon. Pour démontrer l'implication du microbiote dans le maintien de la barrière épithéliale, l'état des bactéries au sein du microbiote fécal sera abordé par séquençage de l'ARN 16s et corrélé avec les données précédentes. Cette implication sera ensuite confirmée par des expérimentations du transfert du microbiote fécal.
- 2 - La compréhension des mécanismes par lesquels le microbiote pourrait interagir avec le système immunitaire. L'état fonctionnel du microbiote fécal sera mesuré par séquençage shotgun et celui du système immunitaire du même animal par une analyse transcriptomique des cellules immunitaires issues du côlon. Les données seront corrélées à l'aide d'outils mathématiques et statistiques. Cette partie permettra d'identifier de nouvelles pistes thérapeutiques pour réduire la toxicité digestive radio-induite.

Mots clés : radiothérapie, toxicité digestive, symbiose « inflammation hôte/microbiote ».

SUJET DE LA THÈSE

Rôle de l'inflammation et de l'autophagie dans la réponse cellulaire à une exposition à faible dose d'uranium sur un modèle organoïde rénal et sa comparaison *in vivo* chez la souris

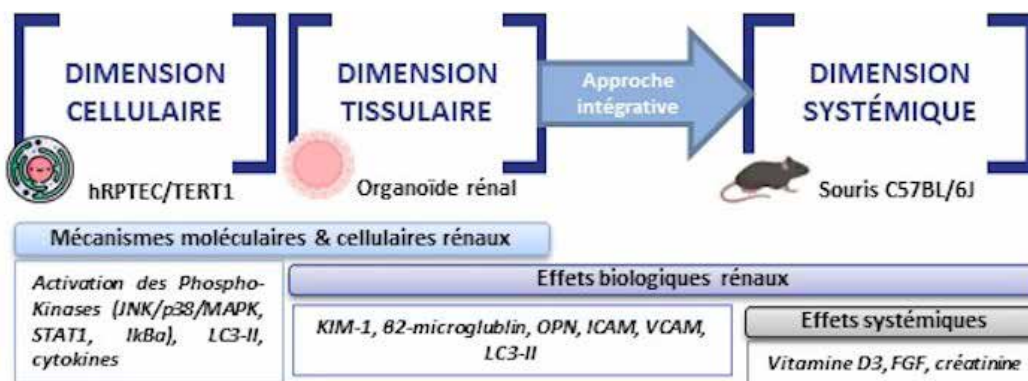
Doctorante : Clémence FINET
 Date du début de la thèse : 12/10/2023
 Laboratoire IRSN : PSE-SAN/SESANE/LRSI
 Référent IRSN de la thèse : Yann GUEGUEN
 Direction de la thèse : Yann GUEGUEN/IRSN & Sabine SANTUCCI/Université de Nice
 École doctorale : Université Paris-Saclay - Innovation thérapeutique: du fondamental à l'appliqué - ED 569
 Financement de la thèse : projet ANR BioCUBK

L'uranium est un radioélément naturellement présent dont les applications civiles ou militaires peuvent conduire à un risque accru d'exposition à faible dose. Les reins et les os sont les principaux organes cibles de ce radionucléide. Le projet ANR BioCUBK vise à comprendre le comportement de l'uranium et les réponses moléculaires et cellulaires induites par une exposition chronique à faible dose au niveau des reins et des os. Un consortium multidisciplinaire de spécialistes de l'uranium a été mis en place pour répondre aux différents aspects de ce projet (interactions biochimiques, distribution spatiale, voies de signalisation). En tant que partenaire n°2 de ce projet, nos travaux contribueront à répondre à la première question de la stratégie de recherche de l'IRSN : "Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ?". La démarche scientifique de la thèse repose sur une approche multi-modèles qui permettra d'étudier les différents aspects (moléculaire, cellulaire, systémique) de la réponse biologique après une exposition chronique à de faibles doses d'uranium.

L'utilisation d'un modèle cellulaire en 2D permettra d'explorer spécifiquement les mécanismes moléculaires et cellulaires rénaux (autophagie, voie MAPK/p38, STAT1) mis en jeu chez des cellules épithéliales (hRPTEC) – chargé de la réabsorption de l'uranium au niveau du tubule rénal. Les résultats préliminaires suggèrent l'apparition d'une cytotoxicité à des doses plus faibles lors d'expositions répétées par rapport à une exposition aiguë à l'uranium sur ces mêmes cellules. Le développement d'un modèle 3D (sphéroïde) à partir de hRPTEC permettra d'obtenir une réponse plus spécifique de ce type cellulaire - qui est la cible de l'uranium - et qui a montré être plus sensible à des stressseurs lorsqu'il est cultivé en 3D. L'utilisation d'un second modèle cellulaire en 3D (organoïde) permettra de comparer les mécanismes impliqués dans le modèle précédent en intégrant jusqu'à 15 types cellulaires présents au niveau du rein, tout en permettant une première évaluation des effets biologiques et physiopathologiques rénaux.

En parallèle des études *in vitro*, l'utilisation d'un modèle murin (C57BL/6J) *in vivo* permettra une approche intégrative en examinant les effets systémiques, notamment les relations hormonales (vitamine D, FGF) étroites existant entre les os et les reins.

Mots clés : radiotoxicologie, faible dose, exposition chronique, uranium.



SUJET DE LA THÈSE

Impact de l'âge sur les effets cardiovasculaires à long terme après une exposition externe à de faibles doses de Césium 137

Doctorante :	Thin Hinan NABET
Date du début de la thèse :	18/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SESANE/LRTOX
Référent IRSN de la thèse :	Virginie MONCEAU
Direction de la thèse :	Sophie NADAUD/Sorbonne Université
École doctorale :	Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique - ED 394
Financement de la thèse :	IRSN

Les populations vivant dans les zones contaminées à la suite d'accidents nucléaires sont exposées à des radiations chroniques à faibles doses (FD) dont les conséquences sont encore mal évaluées. Quelques études épidémiologiques montrent néanmoins le développement d'altérations pulmonaires et cardiovasculaires dans ces populations. De plus, des taux de morbidité et de mortalité plus élevés ont été enregistrés chez les sujets âgés de la population. Ces résultats semblent montrer une corrélation entre l'âge et l'apparition de pathologies cardiovasculaires dans ces populations. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour définir la mécanistique biologique sous-jacente.

Ce projet de thèse a donc pour objectif de répondre à la première question de la stratégie scientifique de l'IRSN sur les effets d'une exposition à de FD de rayonnements ionisants ; et de mettre en évidence des effets à long terme d'une exposition à de FD de radiation sur le système vasculaire du cœur et du poumon, en fonction de l'âge.

Dans ce projet des souris C57BL/6J males, âgées de 2 et 15 mois sont exposées à une irradiation externe aux rayons gamma, en corps entier et à des doses uniques de 100, 250, 500 et 2000 mGy mimant les doses cumulées d'une exposition externe. Les souris sont étudiées 24h, 15 jours et 3 mois après irradiation. La pression artérielle pulmonaire ainsi que la fonction cardiaque seront évaluées par echo-doppler et sonde Millar. Le remodelage tissulaire notamment la fibrose pulmonaire et cardiaque, ainsi que la néomuscularisation des vaisseaux dans le poumon seront évalués par histologie. Nous quantifierons les progéniteurs résidents qui participent au remodelage vasculaire pulmonaire. Le réseau vasculaire sera reconstitué en 3D via les méthodes de transparence CUBIC et iDISCO. Enfin, les voies de signalisations calciques et inflammatoires seront étudiées par des analyses cellulaires et moléculaires.

Les résultats préliminaires montrent une altération de la fonction cardiaque et une augmentation significative de la pression artérielle pulmonaire dès 250 mGy, accompagnée d'une augmentation significative de la musculation des vaisseaux pulmonaires à partir de 500 mGy (respectivement 34% vs 18% pour le contrôle non irradié).

Ces premiers résultats montrent que l'exposition à de FD (<500mGy) induit des altérations moléculaires et fonctionnelles à l'origine des pathologies vasculaires touchants l'axe poumon-cœur. Enfin cette étude permettra d'obtenir des informations sur un possible risque de maladies cardiovasculaires lié aux rayonnements dans la gamme de doses <0,500mGy et d'identifier un potentiel seuil de dose qui permettra d'envisager des mesures de protection spécifiques.

Mots clés : faibles doses, âge, vasculaire, poumon, cœur.

SUJET DE LA THÈSE

Étude de l'effet d'une exposition externe aiguë à des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants, associée ou non à un facteur de risque vasculaire, sur la microvascularisation cérébrale et cardiaque chez la souris

Doctorante :	Léa OULD BOUKHITINE
Date du début de la thèse :	12/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SESANE/LRTOX
Référent IRSN de la thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Direction de la thèse :	Boris MANOURY/U. Paris-Saclay
École doctorale : Université Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569	
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Des études épidémiologiques réalisées sur des cohortes de travailleurs suggèrent une relation entre l'exposition à des doses faibles et modérées de rayonnements ionisants (RI) et le risque de maladies cérébrovasculaires et ischémiques (Gillies *et al.*, 2017 ; Lopes *et al.*, 2022). A ce jour, les études expérimentales sur le risque de maladies cardiovasculaires dans des gammes de doses faibles ont essentiellement porté sur les maladies associées aux gros vaisseaux, comme l'athérosclérose (Le Gallic *et al.*, 2015 ; Ebrahimiian *et al.*, 2017 ; Mitchel *et al.*, 2011). Ces études n'ont pas montré d'effets délétères, mais plutôt une diminution du nombre et de la taille des plaques d'athérosclérose, et l'augmentation des paramètres anti inflammatoires et anti-oxydants.

Pour mieux comprendre le lien entre exposition aux RI à faibles doses et maladies cérébrovasculaires et ischémiques, des études expérimentales ciblées sur la micro-vascularisation sont nécessaires. En effet, les atteintes microvasculaires sont fortement associées à ces pathologies et à leur morbidité (Bradley & Berry, 2023; Taqueti *et al.*, 2018). Des facteurs de risques connus qui augmentent l'incidence de ces maladies, comme l'obésité ou les dyslipidémies, ont un impact délétère sur la densité capillaire et le réseau microvasculaire (Nagele *et al.*, 2018; Padró *et al.*, 2018).

L'objectif de cette thèse est donc d'identifier la réponse de la microvascularisation cardiaque et cérébrale à une exposition aiguë à des doses faibles à modérées de RI, associée ou non à un facteur de risque tel qu'un régime riche en graisses. Cette thèse s'inscrit dans la stratégie scientifique de l'IRSN en répondant à la question des effets biologiques d'une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, et plus précisément de l'identification d'un potentiel seuil d'apparition des effets délétères.

L'hypothèse est qu'une exposition aux rayonnements ionisants de faibles doses entraîne une raréfaction microvasculaire, et potentialise l'effet délétère du régime gras sur la structure microvasculaire. Pour vérifier cette hypothèse, nous procéderons à une approche *in vivo* en exposant de façon aiguë des souris C57BL/6J à une source externe de RI de type gamma à des doses de 300 mGy, 500 mGy et 1 Gy en corps entier, avec ou sans ajout d'un régime riche en graisses. Les effets seront observés à 4 temps post-irradiation, à court (24h et 15 jours) et long terme (3 et 6 mois). Des paramètres fonctionnels, morphologiques et moléculaires seront évalués pour juger des atteintes physiopathologiques vasculaires cérébrales et cardiaques.

Mots clés : faibles doses, microvascularisation, cœur, cerveau.

SUJET DE LA THÈSE

Effets multigénérationnels d'une exposition intra-utérine à faibles doses et faibles débits de doses de rayonnements ionisants

Doctorant :	Honoré RAHARIVELONARIVO
Date du début de la thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SESANE/LRTOX
Référent IRSN de la thèse :	Stéphane GRISON
Direction de la thèse :	Jean-Charles MARTIN/Aix Marseille Université & Stéphane GRISON / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569
Financement de la thèse :	IRSN

Dans le domaine de la radioprotection, l'évaluation des risques sanitaires à long terme résultant des expositions aux faibles doses de rayonnements ionisants (RI) sur la santé des générations futures est devenue un sujet de préoccupation majeur. Ce projet de thèse s'inscrit dans la thématique de recherche de l'IRSN sur la radio-toxicologie des expositions chroniques ou répétées à de doses de rayonnements ionisants, avec pour objectif de répondre à la première question de sa stratégie scientifique : Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ?

La période de vie intra-utérine est une phase particulièrement sensible qui nécessite un environnement propice pour assurer le bon développement de l'embryon et du fœtus. Au cours de cette période cruciale, les expositions environnementales, telles que les RI, peuvent influencer le développement du fœtus et sa future santé, ainsi que celle de sa descendance. Dans ce contexte, notre hypothèse suggère qu'une exposition intra-utérine à faibles doses de RI pourrait augmenter le niveau de stress oxydant et perturber le processus développemental de programmation fonctionnelle des cellules. Ces altérations de type épigénétique, pourraient conduire à des insuffisances physiologiques d'origine métabolique, rendant l'individu plus vulnérable aux divers stress environnementaux auxquels il sera soumis durant sa vie (exposome).

L'objectif de cette étude est d'identifier des effets métaboliques et biologiques à long terme résultant d'une exposition chronique intra-utérine à de faibles doses de RI. Des souris (C57BL/6J) gestantes ont été exposées pendant l'intégralité de la période de gestation à une dose cumulée de 100 mGy par ingestion d'une solution hydrique de Césium 137. Après le sevrage, les progénitures ont été soit soumises à un régime alimentaire normal, soit riches en lipides (considéré comme stresser environnemental). Dans le cadre de cette étude, les investigations se concentreront essentiellement sur la recherche d'effets chez le jeune adulte (10 semaines) et l'adulte âgée (15 mois).

Il s'agira d'identifier des signatures moléculaires et des effets fonctionnels radio-induits, susceptibles de prédisposer un individu au développement tardif de maladies chroniques (dont l'origine est souvent multifactorielle). Différents systèmes physiologiques tels que le système nerveux central, le système reproducteur, et hépatique, reconnus pour leur sensibilité au stress gestationnel seront principalement étudiés afin d'évaluer l'impact d'une exposition à faibles doses de RI pendant la période de développement embryonnaire et fœtal.

Mots clés : intra, utérine, rayonnements ionisants, faible dose, épigénétique, métabolisme.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation dosimétrique et radiopathologique des lésions radio-induites lors de surexpositions accidentelles aux rayons X de basses énergies : impact du volume, de la localisation et de la qualité du rayonnement

Doctorant :	Alban ROUSSEL
Date du début de la thèse :	18/09/2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Morgane DOS SANTOS
Direction de la thèse :	Morgane DOS SANTOS / IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

Depuis la découverte des rayons X par Röntgen en 1895, leur utilisation n'a cessé de croître que ce soit dans le domaine médical, industriel ou militaire. Aujourd'hui, l'utilisation des rayons X est majoritairement maîtrisée mais des surexpositions accidentelles continuent de se produire. Lorsqu'une dose absorbée de 10 Gy à la peau est dépassée, des effets déterministes apparaissent et se manifestent par le développement d'érythèmes pouvant aller jusqu'à la nécrose tissulaire, musculaire voire osseuse pour les cas les plus sévères. Entre 1980 et 2013 (Coeytaux et al, 2013), 634 accidents déclarés ont impliqué 2390 victimes. Plus de 30 % de ces accidents concernent des rayons X de basses énergies qui, du fait de leurs spécificités, entraînent des dépôts de dose très hétérogènes. Le diagnostic et le pronostic radiopathologique des victimes surexposées à ce type de rayonnements peut alors s'avérer difficile. Afin d'améliorer la prise en charge des victimes, il est nécessaire de mieux connaître les effets biologiques associés à ce type d'expositions et d'améliorer la caractérisation des spécificités radiopathologiques des lésions aux rayons X de basses énergies.

Ce travail s'inscrit ainsi dans la stratégie scientifique de l'IRSN (questions 5 et 6) et notamment dans la thématique de recherche axée sur la radiobiologie et la radiopathologie qui vise à acquérir des connaissances associées aux effets biologiques des rayonnements ionisants, à faible ou forte doses, dans le cas d'expositions accidentelles ou non.

Sur la base des connaissances acquises lors des travaux de thèse menés par Manon Guillou à la tension de 80 kV, les objectifs de cette thèse sont d'évaluer d'une part l'impact de l'énergie des rayons X en appliquant différentes tensions (50 kV, 80 kV, 220 kV, 10 MV) afin de modifier la proportion d'effet photoélectrique, phénomène physique responsable de l'hétérogénéité du dépôt de dose à basse énergie; et d'autre part les impacts du volume et de la localisation de l'irradiation grâce à des collimateurs conçus par simulation Monte Carlo puis validés expérimentalement.

Pour cela, un modèle d'irradiation localisée de la patte chez la souris sera utilisé et caractérisé d'un point de vue physique (dosimétrie, imagerie, modélisation) et biologique (suivi lésionnel, histologie, expression génique) pour des temps allant jusqu'à 6 mois post-irradiation. Les doses absorbées par les différents tissus seront mesurées expérimentalement (à l'os par spectroscopie par Résonance Paramagnétique Électronique et au tissu mou à l'aide de fantômes) puis comparées aux données obtenues par simulation Monte Carlo dans des fantômes voxelisés.

Mots clés : dosimétrie, surexposition accidentelle, radiopathologie, simulation Monte Carlo.

SUJET DE LA THÈSE

**Analyse statistique des associations entre expositions multiples
aux rayonnements ionisants et à d'autres facteurs de risques et pathologies chroniques
dans la cohorte CONSTANCES**

Doctorante :	Justine SAUCE
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Sophie ANCELET
Direction de la thèse :	Olivier LAURENT / IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	IRSN

Alors que les effets cancérogènes des doses élevées de rayonnements ionisants (RIs) sont bien établis, l'impact sur les risques de pathologies chroniques des faibles doses inhérentes à notre quotidien demeure à préciser. Pourtant, les expositions aux RIs sont omniprésentes, l'ensemble de la population y est exposé tout au long de sa vie, qu'elles proviennent de sources environnementales, médicales, ou professionnelles. D'autre part, il semble essentiel de considérer les expositions aux RIs et à d'autres facteurs de risques dans leur ensemble, plutôt que d'étudier séparément leur effet sur la santé. Certains peuvent agir en synergie et d'autres se compenser. Enfin, ces facteurs n'ont pas le même impact selon le moment de la vie où l'on y est exposé, ni selon la durée de l'exposition.

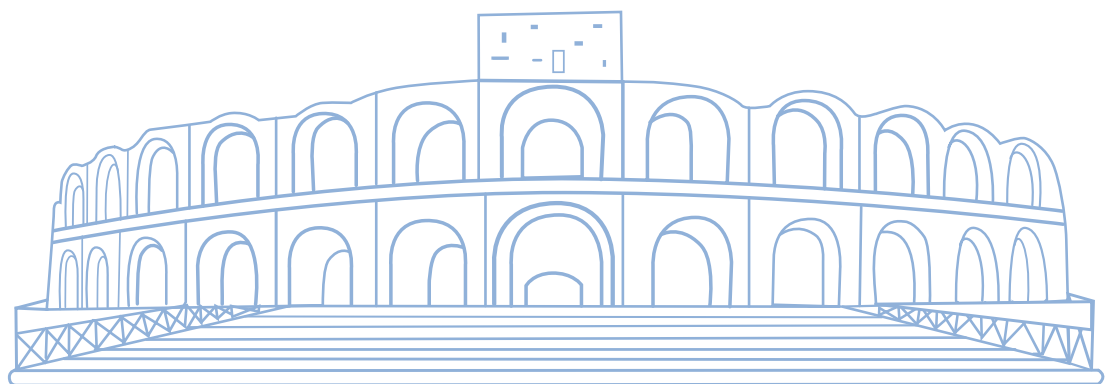
L'objet de cette thèse est d'intégrer, année après année, l'ensemble des expositions aux RIs auxquelles un individu est soumis depuis sa naissance et d'en caractériser les effets sur le développement de pathologies chroniques, en s'appuyant sur les données de la cohorte CONSTANCES, en tenant compte de potentiels effets cocktails (e.g. dus à des interactions entre effets d'expositions aux RIs et à des substances chimiques).

Cette thèse s'articule autour de 3 sous-objectifs distincts :

1. Reconstituer pour 76 000 participants de la cohorte CONSTANCES, les doses de RIs aux organes à différents stades de la vie, provenant de sources environnementales, médicales et professionnelles, en collaboration avec des unités spécialisées de l'IRSN.
2. Estimer les associations potentielles entre les doses de RIs intégrées sur la vie entière et différentes pathologies chroniques d'intérêt (e.g. cancers, pathologies de l'appareil circulatoire, neurodégénératives) en tenant compte des expositions à d'autres facteurs de risque potentiels (ex : tabac, alcool, etc...) - via des modèles de survie avec covariables dépendantes du temps.
3. Explorer des associations entre cancers et polluants chimiques, en co-expositions avec les RIs via des modèles de survie. Tester des méthodes de machine learning et éventuellement, d'analyse de sensibilité globale pour identifier les facteurs de risque (incluant les expositions chimiques et radiologiques) importants. Explorer des modèles probabilistes spécifiques tels que les modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour identifier, estimer et caractériser l'effet sanitaire des multi-expositions aux RIs et aux polluants chimiques.

Cette démarche s'inscrit dans le questionnement n°1 de la stratégie de recherche dans le domaine de la radioprotection de l'IRSN, visant à évaluer les effets sanitaires associés aux expositions à de faibles doses de RIs.

Mots clés : cohorte CONSTANCES, rayonnements ionisants, biostatistiques, pathologies chroniques, sciences des données.



Salle Bouvine

Mercredi 3 avril 13 h 15 - 14 h 30

Jeudi 4 avril 13 h 15 - 14 h 30

Doctorants de 1^{re} année
PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

> UNITÉ DE RECHERCHE EN SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Hend AL ELANI - Reduction of Uncertainties in Civil Engineering Structure Models through Bayesian Approaches: Application to Containment Vessels of Nuclear Reactors.

Peio BERRÉCOCHÉA - Modélisation CFD d'écoulements diphasiques et vibrations induites au sein d'un faisceau tubulaire soumis à un écoulement transverse.

João BOUCHAIN - Étude du comportement du chrome dans le circuit primaire d'un réacteur à eau pressurisée en cas d'accident grave – interaction avec les produits de fissions (Cs, Mo).

Léo FALQUET - Étude numérique du comportement thermomécanique de la croûte supérieure du bain de corium en situation d'ICB renoyé : mieux évaluer les flux de chaleur vers l'eau et ceux vers le béton.

Florian GOSSARD - Statistiques et machine learning pour la prédiction de sorties complexes avec application à la sûreté nucléaire.

Billy Aurel KAMTCHUENG TCHUENBOU - Modélisation algébrique des flux turbulents pour des écoulements avec masse volumique variable en approche RANS et hybride RANS/LES.

Anaïs MASSALOUX - Étude expérimentale des interactions entre le ruthénium et les NOx avec prise en compte des effets de surface.

Juan Antonio MONLEON DE LA LLUVIA - Neutronic Simulation Uncertainties Propagation for Studies of Nuclear Vessel Ageing Under Irradiation.

Arthur ROBLIN - Apport de l'intelligence artificielle pour l'amélioration des performances des moniteurs de contamination atmosphérique.

Guillaume SCHMIT - Améliorer les performances et la capacité de généralisation des modèles d'intelligence artificielle.

Marine TESSIER - Gérer les compétences : entre pratiques quotidiennes et usages des dispositifs.

SUJET DE LA THÈSE

Reduction of Uncertainties in Civil Engineering Structure Models through Bayesian Approaches: Application to Containment Vessels of Nuclear Reactors

Doctorante :	Hend AL ELANI
Date de début de thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP/SES/ LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	David BOUHJITI
Direction de la thèse :	Ludovic JASON/CEA & Benjamin RICHARD/IRSN
École doctorale :	Université Paris Saclay – Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences (SMEMaG) - ED579
Financement de la thèse :	CEA & IRSN

My research work, as a first-year doctoral student at IRSN and CEA, aims at addressing the issue of uncertainty propagation and reduction in numerical simulations of reinforced and pre-stressed concrete structures with a containment role: ex. Nuclear Containment Buildings (NCB) of the French PWR. I am seeking a numerical methodology based on digital twinning coupled to experimental data and user's feedback. This shall improve our understanding of the impact of uncertainties on the reliability of the structural and functional behaviour of NCBs using realistic models for phenomena related to nuclear and radiological risks. So, my ambition is to answer the following questions:

- What are the main sources of uncertainties in our current numerical simulations and how do they impact the accuracy and reliability of our predictions?
- What are the challenges associated with current methodologies for uncertainty reduction in structural analysis and how can they be addressed?
- How can advanced probabilistic methods be used to enhance our assessment of the risk to lose tightness of NCBs under operational and accidental conditions?

To do so, I will develop a methodology for inverse analysis using Bayes-inference approaches. The principle is to update the estimation of probability density functions (PDFs) associated with the model's inputs by comparing simulated outputs with experimental data from different experimental campaigns conducted at the structural scale, such as the VerCoRs mock-up which is a 1/3 scaled NCB. The numerical developments will be made using Cast3M for finite element analysis and URANIE for the probabilistic coupling. Both software programs are developed by CEA.

The general outline of my work involves (a) an extensive review of existing literature on numerical models for the long-term ageing of concrete in reinforced and pre-stressed structures, focusing on the quantification of uncertainties of concrete properties; (b) a comprehensive analysis of experimental databases from various references at both reduced (mock-up) and full scales to be used during the Bayesian updating step; (c) a robust implementation of the Bayesian techniques for inverse analysis to update the PDFs of our inputs based on the experimental results from the database. The object of application is the NCBs subjected to continuous thermos-hydro-mechanical loads showing long term ageing patterns (creeps, shrinkages, drying, cracking, prestressing losses, etc.).

Finally, my results will enhance the predictive accuracy of current models used by IRSN and better assess the behaviour of ageing nuclear buildings in the presence of aleatoric and epistemic uncertainties.

Mots clés : Bayes updating, uncertainty reduction, reinforced concrete, ageing, cracking and leakage.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation CFD d'écoulements diphasiques et vibrations induites au sein d'un faisceau tubulaire soumis à un écoulement transverse

Doctorant :	Peio BERRÉCOCHÉA
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Daniele VIVALDI
Direction de la thèse :	Dominique LEGENDRE/IMFT
École doctorale :	Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN

L'état de l'art en matière de simulation numérique des écoulements eau-vapeur à l'intérieur des générateurs de vapeurs (GV) consiste à utiliser des approches de milieux poreux homogènes à deux phases. À cette échelle, les résultats de la simulation ne peuvent pas prendre en compte la configuration locale de l'écoulement diphasique (c'est-à-dire les régimes d'écoulement diphasique) du mélange eau-vapeur du circuit secondaire dans les GV. Par conséquent, les forces fluides exercées sur les tubes ne peuvent pas être décrites de façon précise, ce qui ne permet pas de caractériser leur réponse vibratoire à l'écoulement eau-vapeur. L'intérêt de connaître la réponse vibratoire des tubes est de pouvoir prévenir des risques de rupture de ces tubes, et ainsi d'éviter une fuite radioactive du circuit primaire vers le circuit secondaire. Une approche de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) est donc nécessaire pour prédire les structures d'écoulement diphasique afin d'obtenir la réponse vibratoire des tubes.

L'objectif de la thèse est d'utiliser, d'analyser et d'améliorer les méthodes CFD dites "tous régimes d'écoulement", pour des configurations représentatives des écoulements diphasiques transverses dans les faisceaux tubulaires. Le code CFD utilisé est le code Neptune_CFD, propriété d'EDF et dont l'IRSN est l'un des partenaires. Les méthodes présentes dans ce logiciel permettent de modéliser les petites interfaces diphasiques (bulles, gouttelettes) selon une approche "dispersée" (c'est-à-dire moyennée) et de résoudre explicitement les "plus grandes" structures diphasiques (dont l'interface est suffisamment grande pour être reconnue et décrite par la grille numérique employée). Malgré leur potentiel, un certain nombre de défis et de faiblesses ont été identifiés lorsque ces approches sont appliquées à des configurations d'écoulement transverse aux faisceaux de tubes. L'objectif de la thèse consiste à vérifier la cohérence des modèles existants, de les optimiser et, si nécessaire, de développer de nouveaux modèles pour la description des phénomènes physiques sous-jacents. Les résultats expérimentaux obtenus avec la manipulation TREFLE de l'IRSN (vitesses, taux de vide, forces sur les tubes, déplacement des tubes), constitueront la base de données expérimentales de référence pour analyser et évaluer la cohérence des résultats numériques. D'autres résultats expérimentaux disponibles en littérature et via le projet européen GO-VIKING pourront être exploités. Une fois consolidée, l'approche CFD permettra de réaliser des études de sensibilité sur l'impact du mélange diphasique spécifique (mélange prototypique vapeur-eau vs air-eau) sur les régimes d'écoulement diphasique et les vibrations du tube.

Mots clés : CFD diphasique, faisceau tubulaire, multi, régime.

SUJET DE LA THÈSE

Étude du comportement du chrome dans le circuit primaire d'un réacteur à eau pressurisée en cas d'accident grave – interaction avec les produits de fissions (Cs, Mo)

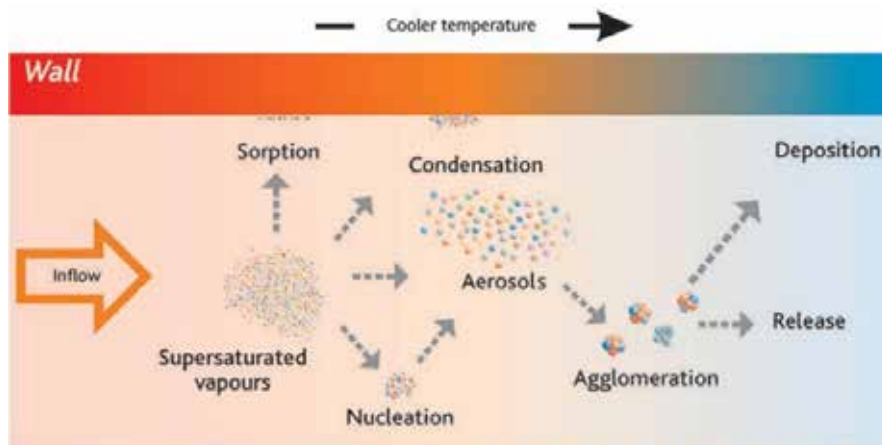
Doctorant :	João BOUCHAIN
Date du début de la thèse :	12/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Anne-Cécile GREGOIRE
Direction de la thèse :	Jean-françois PAUL/Université de Lille I & Anne-Cécile GREGOIRE/IRSN
École doctorale :	Université de Lille - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (SMRE) - ED 104
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Des combustibles alternatifs ou Accident Tolerant Fuel (ATF) sont aujourd'hui en cours d'étude afin d'élargir les marges de sûreté en cas d'accidents nucléaires de type Accident par Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Les concepts d'ATF les plus prometteurs incorporent du chrome, soit dans la gaine de combustible (revêtement ou alliage base chrome), soit en dopage des pastilles de combustible. La quantité de chrome ainsi présente dans le cœur s'élèverait jusqu'à quelques centaines de kilogrammes. Plusieurs études montrent l'effet bénéfique du chrome pour retarder l'Accident Grave (AG) mais il devient nécessaire d'en étudier le comportement si une telle situation survenait. En effet, le chrome est volatil à haute température sous forme d'oxyde ou oxy-hydroxyde, et les conséquences d'un relâchement depuis le combustible dégradé, puis transporté via le circuit primaire jusque de l'enceinte sont à considérer. Toxique par lui-même, le chrome pourrait aussi impacter le terme source (la quantité d'éléments relâchés dans l'environnement en cas d'AG) en interagissant avec les autres produits de fissions. L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement du chrome lors de son transport dans le circuit primaire dans une telle situation. Comme le montre la figure ci-dessous : les phénomènes dans le circuit primaire sont très complexes impliquant à la fois la chimie de la phase gazeuse et des phases condensées.

Pour mener à bien cette étude, le comportement du chrome seul à haute température a fait l'objet de travaux préliminaires. Durant la thèse de plus amples essais seront d'abord réalisés sur le chrome seul puis en association avec des produits de fissions les plus volatils selon la littérature : césium et molybdène. Plusieurs méthodes d'analyses seront nécessaires pour quantifier (ICP-AES) et identifier (IR/DRX/UV-Visible) les espèces produites lors des essais de vaporisation, impliquant la collaboration de l'Unité de Catalyse et de Chimie du Solide (UCCS) à Lille pour les analyses de surfaces (XPS/TOF-SIMS). Les protocoles analytiques ont déjà été investigués durant l'étude préliminaire.

En complément de ces travaux expérimentaux, une étude thermocinétique utilisant plusieurs bases de données (SGPS/SGTE/Mephista/...) ainsi que plusieurs logiciels (FactSage/NUCLEA ToolBox/SOPHAEROS) sera réalisée et servira de base pour l'interprétation des essais. Les résultats permettront d'alimenter des modèles chimiques dans ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code, logiciel de simulation des AG développé par l'IRSN).

Mots clés : ATF, accident grave, circuit primaire, chimie transport, chrome, césium, molybdène, produits de fission.



SUJET DE LA THÈSE

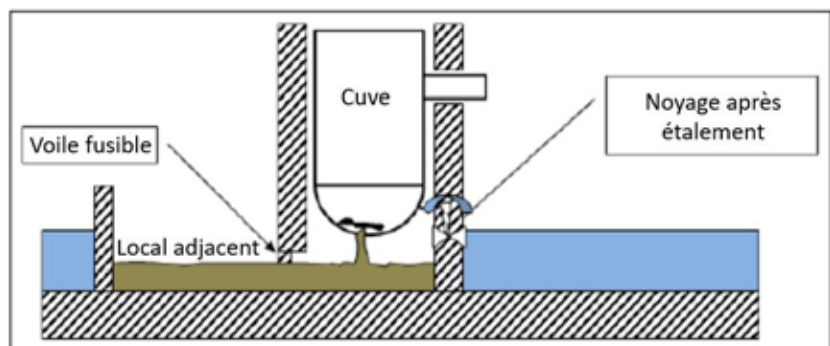
**Étude numérique du comportement thermomécanique de la croûte supérieure
du bain de corium en situation d'ICB renoyé : mieux évaluer les flux de chaleur vers l'eau
et ceux vers le béton**

Doctorant :	Léo FALQUET
Date du début de la thèse :	02/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SAM/LEPC
Référent IRSN de la thèse :	Florian FICHOT
Direction de la thèse :	Yann MONERIE/Université de Montpellier 2 & Florian FICHOT/IRSN
École doctorale :	Université de Montpellier - Information, Structures, Systèmes (I2S) - ED 166
Financement de la thèse :	IRSN

Lors d'un accident grave sur un réacteur nucléaire, il peut arriver que le cœur du réacteur ne soit plus refroidi assez efficacement et fonde (comme à Fukushima). Le mélange de matériaux fondus, appelé corium, doit alors être refroidi rapidement pour éviter qu'il ne perce l'enveloppe en béton, dernière barrière de confinement, et contamine par la suite les sols environnants. Le corium est refroidi par de l'eau sur le dessus mais cela a pour conséquence de créer une croûte solide sur la partie supérieure. Cette croûte ralentit le refroidissement de la partie encore liquide en-dessous et donc sa solidification. Cependant, le gradient thermique dans la croûte peut créer des fissures dans lesquelles l'eau peut s'infiltrer et évacuer la chaleur efficacement. L'objectif de cette thèse est de modéliser la fissuration de la croûte due au gradient thermique, puis d'évaluer les flux de chaleur sortant pour connaître la vitesse de propagation du front de solidification du corium.

Cette étude comporte trois étapes. La première est d'étudier le phénomène de fissuration dans la croûte en utilisant des outils numériques appelés modèles de zones cohésives. Ces modèles utilisent le formalisme de la modélisation par éléments finis mais imposent entre chaque élément du maillage une loi de contact qui lie les contraintes de traction et de cisaillement aux déplacements. En imposant des déplacements seuils, il est alors possible de prédire les chemins de fissuration. La deuxième étape, qui devrait commencer au cours de la première année, consiste à simuler l'écoulement de l'eau dans les fissures. La difficulté est de prendre en compte les frottements entre les parois et le fluide, ainsi que les interactions entre l'eau s'infiltrant dans les fissures et celui de la vapeur sortant des fissures. Des modèles sont disponibles dans la littérature et serviront de base à la simulation numérique. La dernière étape sera ensuite de coupler ces deux phénomènes et calculer la vitesse de propagation du front de solidification du corium.

Mots clés : thermomécanique, fissuration, corium, simulation numérique.



Stratégie pour la stabilisation du corium dans l'enveloppe des REP du parc français.

SUJET DE LA THÈSE

Statistiques et machine learning pour la prédiction de sorties complexes
avec application à la sûreté nucléaire

Doctorant :	Florian GOSSARD
Date du début de la thèse :	15/11/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Jean BACCOU
Direction de la thèse :	Francois BACHOC/Université Paul Sabatier & Jean BACCOU/IRSN
École doctorale :	Université Toulouse 3 - Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT) - ED 475
Financement de la thèse :	NEEDS

La problématique au centre de ma thèse est l'analyse et la prédiction de données fonctionnelles. Cette problématique s'inscrit dans plusieurs axes de recherche de l'IRSN pour lesquels on retrouve ce type de données. En particulier, c'est le cas en thermohydraulique, dans le domaine de la simulation numérique pour les études de renoyage suite à un accident nucléaire. En pratique, la quantité de données simulées peut être insuffisante pour analyser finement le phénomène d'intérêt sur tout son domaine de variation en raison du coût de calcul d'une simulation. Pour permettre une analyse plus exhaustive de ces phénomènes, on souhaite générer de nouvelles données approchées à l'aide d'un modèle rapide à évaluer (appelé métamodèle). Cette thèse a pour objectif de construire de nouveaux métamodèles en exploitant des techniques d'apprentissage statistique pour des données fonctionnelles qui sont par exemple des histogrammes décrivant la répartition de températures simulées dans le cœur d'un réacteur. Si la construction de métamodèles pour des données scalaires a été très étudiée, elle reste un axe de recherche actif dans la littérature dans le cas de données fonctionnelles.

La première approche, suggérée par de récents travaux^[1], sera d'étudier l'interpolation de mesures et notamment l'usage de splines pour obtenir des reconstructions lisses. L'essence du problème consiste à construire un couplage entre les différentes mesures à interpoler. La notion de barycentre de Wasserstein offre un couplage entre les différentes mesures et s'est montré très efficace dans des problèmes de traitement d'objets complexes. C'est pourquoi, le barycentre de Wasserstein sera exploité lors de cette thèse pour construire un prédicteur pertinent quand les données seront de type histogramme. La seconde approche quant à elle concernera la construction d'un modèle bayésien basé sur des processus gaussiens. Malgré un nombre conséquent de travaux sur les processus gaussiens, peu concernent des sorties complexes comme celles étudiées dans cette thèse. Un modèle bayésien est particulièrement intéressant pour la mise en place de stratégies itératives et probabilistes de planification d'expériences. Une série d'applications en thermohydraulique issues des projets de l'IRSN sera ensuite réalisée pour valider ces nouveaux développements. On s'intéressera en particulier aux études numériques du phénomène de renoyage.

Mots clés : statistiques, machine learning, transport optimal.

[1] S. Chewi *et al.* Fast and Smooth Interpolation on Wasserstein Space. Oct. 22, 2020. arXiv: 2010.12101 [math, stat].
url: <http://arxiv.org/abs/2010.12101>.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation algébrique des flux turbulents pour des écoulements avec masse volumique variable en approche RANS et hybride RANS/LES

Doctorant :	Billy Aurel KAMTCHUENG TCHUENBOU
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SA2I/LIE
Référent IRSN de la thèse :	Fabien DUVAL
Direction de la thèse :	Pierre SAGAUT / Aix-Marseille Université (AMU) & Christophe FRIESS / AMU
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du questionnement scientifique associé au domaine de la sûreté sur la modélisation des contraintes générées sur l'installation par une explosion ou un incendie. Dans le cadre de l'évaluation des risques d'explosion, une première phase d'évaluation des écoulements et de la dispersion est nécessaire. Cette phase est particulièrement importante pour les locaux de grande taille typique des installations nucléaires où la formation d'une atmosphère explosive est fortement conditionnée par les phénomènes de stratification des gaz combustibles et le mélange turbulent. Les situations d'incendie dans les locaux génèrent également des écoulements où les forts contrastes de masse volumique et le niveau de turbulence jouent un rôle important dans l'intégrité des matériels importants pour la sûreté. Pour ces deux problématiques, la qualité des prévisions des outils de simulation numérique repose en grande partie sur la prédiction d'écoulements turbulents avec de forts effets de flottabilité.

Les développements proposés s'inscrivent dans ce cadre et s'articulent autour de deux axes. Le premier concerne le développement de modèles algébriques issus d'une modélisation au second ordre dans un contexte RANS. Ces modèles sont en effet connus pour améliorer de manière significative la modélisation des flux turbulents tout en conservant les performances et la robustesse des modèles de viscosité turbulente. Le deuxième axe s'intéresse à une extension au contexte hybride RANS/LES afin de s'affranchir des limites inhérentes aux modèles RANS sans toutefois dégrader significativement le temps de calcul réputé comme rédhibitoire en LES pour les études. Les principales étapes réalisées au sein de l'outil CALIF3S de l'IRSN sont regroupées de la manière suivante :

- La première année sera consacrée au développement d'un modèle algébrique capable de décrire des situations où la masse volumique varie significativement. La validation du modèle sera menée sur des cas académiques sans effets de parois.
- On s'intéressera en deuxième année à la prise en compte des effets de parois par pondération elliptique. Une extension du modèle sera proposée dans un contexte hybride RANS/LES selon une approche de type DES équivalente. La validation sera menée principalement sur des cas académiques.
- La troisième année sera consacrée à la mise en œuvre des modèles développés. Il s'agira de poursuivre le travail de validation et de comparer les prévisions des approches RANS et hybride RANS/LES sur des configurations représentatives d'écoulements stratifiés dans les locaux de grande taille.

Mots clés : turbulence, masse volumique variable, modélisation algébrique, CALIF3S.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale des interactions entre le ruthénium et les NOx avec prise en compte des effets de surface

Doctorante :	Anaïs MASSALOUX
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Marie-Noëlle OHNET
Direction de la thèse :	Christophe VOLKRINGER/Université Lille 1, UCCS & Thierry LOISEAU/Université de Lille
École doctorale :	Université de Lille - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (SMRE) - ED 104
Financement de la thèse :	IRSN & ORANO

Lors du retraitement du combustible usagé (procédé PUREX^[1], ORANO Recyclage La Hague), les Produits de Fissions (PFs) résiduels sont stockés dans des cuves de solution nitrique concentrée, dont le refroidissement compense le dégagement de chaleur induit par les PFs. En cas de perte totale de ce refroidissement, la solution va s'échauffer, jusqu'à potentiellement atteindre l'ébullition induisant des rejets de PFs, dont le ruthénium gazeux, dans le circuit d'évacuation des cuves (scénario d'intérêt suite aux évaluations complémentaires de sûreté post-Fukushima). A noter qu'en plus de sa faculté à former des oxydes très volatils, le ruthénium présente une radiotoxicité importante par ses isotopes radioactifs 106Ru et 103Ru (T1/2 respectifs de 369 et 39,5 jours)^[2].

L'objectif de la thèse est de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques pilotant les interactions entre le ruthénium et les oxydes d'azote (NOx) avec la prise en compte des effets de surface. Pour cela, les phénomènes en phase gazeuse seront investigués au cœur du mélange gazeux et à l'interface avec une surface solide (coupons aciers simulant les gaines de ventilation avec ou sans dépôts préalables de Ru). Les résultats obtenus contribueront à améliorer les modèles en cours de développement à l'IRSN (SAM/LETR^[3]) utilisés pour quantifier les rejets de Ru dans le contexte des installations LUDD^[4] et implantés dans le code ASTEC^[5] (modèle SOPHAEROS).

Dans un premier temps, la stabilité du RuO4(g), espèce gazeuse ruthénée la plus probable, sera étudiée en système fermé. Pour cela, un réacteur double enveloppe composé de deux chambres est à l'étude. Le RuO4(g) est généré en oxydant une poudre commerciale RuO2.xH2O avec de l'ozone. Des prélèvements gazeux seront réalisés périodiquement, dissous dans la soude puis analysés par ICP-AES afin de doser le Ru. Une autre expérience consiste à quantifier des rejets gazeux de NO2/HNO3 à partir d'une solution de HNO3(l) en ébullition par IRTF ou au moyen d'un détecteur spécifique aux NOx. Par ailleurs, les isothermes d'adsorption et/ou la réactivité de NOx sur une poudre de RuO2, et possiblement sur différents aciers, seront déterminées expérimentalement (réalisation à l'UCCS de Lille). Enfin, les matériaux soumis aux NOx et au RuO4(g) seront caractérisés (analyses de surface) afin d'identifier les sites d'interactions, et ainsi mieux comprendre les mécanismes d'adsorption.

Mots clés : PUREX, ruthénium, milieu nitrique, interactions Ru/NOx, effets de surface.

[1] Plutonium Uranium Refining by Extraction.

[2] MUN C. *et al.*, Applied Surface Science 253, 7613-7621, 2007.

[3] Laboratoire d'Étude des Transferts de Radioéléments.

[4] Laboratoire-Usine-Déchet-Démantèlement.

[5] Accident Source Term Evaluation Code.

SUJET DE LA THÈSE

Neutronic Simulation Uncertainties Propagation for Studies of Nuclear Vessel Ageing Under Irradiation

Doctorant :	Juan Antonio MONLEON DE LA LLUVIA
Date du début de la thèse :	30/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SNC/LN
Référent IRSN de la thèse :	Mariya BROVCHENKO
Direction de la thèse :	Eric DUMONTEIL/CEA
École doctorale :	Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

This thesis examines the methods used to assess how the pressure vessels in French pressurized water reactors (PWRs) become brittle due to neutron irradiation, especially important for extending their operational life. The main question focuses on the accuracy of using fast fluence (a measure of neutron exposure) as the primary indicator of this damage in the models based on the utility's irradiation monitoring program. This approach is questioned due to different conditions experienced by test samples compared to actual vessel materials. The research investigates the primary effects of neutron interactions on the vessel's atoms and how these effects are measured, connecting the fields of neutronics and material science. It also explores how uncertainties in nuclear data affect our understanding of the vessel's material damage. By examining these factors, the thesis aims to improve the safety evaluations for PWRs, particularly as they operate for longer periods, potentially up to 60 or 80 years.

Detailed Program and Associated Means:

- Exploring New Energy Ranges: The thesis suggests focusing on under-researched energy ranges below 1 MeV to broaden the understanding of irradiation damage.
- Introduction of New Techniques: The research will investigate the use of advanced techniques for uncertainty propagation, such as "Fast GRS," (Fast Gaussian Random Sampling) and "Fast TMC," (Fast Total Monte Carlo) This exploration is aimed at providing means for usually very time consuming but precise simulations to be used for the analysis of the uncertainties of the neutron irradiation damage indicators.
- Methods validation: A thorough comparison of different methods used in the Monte Carlo codes for the sensitivity calculations is conducted, focusing on the precision and reliability of the evaluated sensitivities. This comparative study is vital to discuss the precision of the neutron fluence evaluation.
- Methodological Approach: The research is divided into stages, including sensitivity analysis, sampling of nuclear data, extensive Monte Carlo calculations, and employing data assimilation methods like GLLSM (Generalized Local Linear Stochastic Model) or BMC (Bayesian Model Combination) for refined fluence uncertainty assessment.

The thesis contributes significantly to nuclear safety by proposing innovative experiments, exploring new energy ranges, and enhancing techniques to better understand uncertainties. This research paves the way for future studies on PWR vessel ageing and irradiation, aligning with IRSN's goals in nuclear safety and radiation protection.

Mots clés : neutron Irradiation, pressure vessel ageing, uncertainty propagation, Monte Carlo simulation, nuclear safety.

SUJET DE LA THÈSE

Apport de l'intelligence artificielle pour l'amélioration des performances des moniteurs de contamination atmosphérique

Doctorant :	Arthur ROBLIN
Date du début de la thèse :	16/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SCA/LPMA
Référent IRSN de la thèse :	Grégoire DOUGNIAUX
Direction de la thèse :	Santiago VELASCO/Centre de morphologie mathématique
École doctorale :	COMUE PSL - Ingénierie des systèmes, matériaux, mécanique, énergétique - ED 621
Financement de la thèse :	IRSN

Sur les sites nucléaires, et en particulier sur les chantiers de démantèlement, des moniteurs de la radioactivité aéroportée sont déployés afin de s'assurer que les limites d'exposition de radioprotection des travailleurs en termes d'activités volumiques sont respectées. Pour ce faire, ce type d'instrument prélève les aérosols de l'air ambiant en continu sur un filtre et mesure en temps réel la radioactivité accumulée sur ce filtre. Il doit alerter les personnels en cas de détection d'une contamination atmosphérique d'origine artificielle.

Pour la détection des émetteurs alpha artificiels (par exemple le ^{239}Pu), le moniteur doit estimer en continu et en temps réel la contribution des descendants du radon qui interfèrent dans la voie de mesure alpha artificielle. En conditions nominales, cette estimation est très correctement faite mais, dans le cas particulier des chantiers de démantèlement, les variations soudaines de l'empoussièrément, en termes de granulométrie et de concentration des aérosols, entraînent une perturbation de la mesure nucléaire liée à une mauvaise estimation du bruit de fond qui se traduit in fine par une surestimation de l'activité alpha artificielle. Cela peut conduire à une fausse alarme et à un arrêt de chantier. Afin d'améliorer l'estimation du bruit de fond, il a été montré que la prise en compte de la distribution granulométrique de l'aérosol était nécessaire.

Durant la thèse, un algorithme d'apprentissage statistique va être développé permettant de détecter de façon automatique la présence ou l'absence d'émetteurs alpha artificiels à partir de la connaissance de la mesure du spectre alpha (forme du spectre et temps d'acquisition) éventuellement accompagnée d'une information sur la taille des aérosols déposés sur le filtre. L'utilisation d'un tel algorithme est une solution prometteuse pour développer une nouvelle stratégie de compensation de la contamination due aux descendants du radon.

En exploitant la base de données acquise au laboratoire sur le banc d'essais ICARE de l'IRSN, on commencera par adopter un modèle d'apprentissage statistique ayant des performances satisfaisantes. On pourra pour cela envisager notamment la modification de la fonction coût et la mise en œuvre de modèles complexes tels que les réseaux de neurones récurrents ou convolutionnels. Afin de renforcer la confiance dans le modèle retenu, on cherchera à identifier les caractéristiques des données mal prédites puis à progresser sur l'analyse de l'explicabilité du modèle. Enfin, il est envisagé de construire la même démarche pour quantifier précisément les rayonnements artificiels et identifier les caractéristiques des aérosols.

Mots clés : IA, aérosols, radioactivité, spectres d'énergies.

SUJET DE LA THÈSE

Améliorer les performances et la capacité de généralisation des modèles d'intelligence artificielle

Doctorant :	Guillaume SCHMIT
Date du début de la thèse :	06 / 11 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Eric CHOJNACKI
Direction de la thèse :	Armelle BRUN/LORIA & Matthieu D'AQUIN/LORIA
École doctorale : Université de Lorraine – Informatique - Automatique - Électronique - électrotechnique - Mathématiques (IAEM) - ED 77	
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

L'IRSN cherche à décrire les phénomènes physiques pouvant conduire à des accidents et à en évaluer les conséquences. Pour cela, des logiciels ont été développés pour simuler l'évolution de scénarii accidentels. Ces logiciels constituent une accumulation des connaissances théoriques et expérimentales acquises au cours d'années de recherche.

Ces outils logiciels sont développés à partir d'une formalisation mathématique précise des processus physiques mis en jeu. Ces outils logiciels peuvent décrire avec une bonne précision l'évolution d'un scénario accidentel dès lors que les conditions initiales et limites peuvent être déterminées. La précision des résultats dépend cependant de la complétude des phénomènes modélisés et de la qualité des modèles physiques et numériques.

L'IRSN a développé deux systèmes experts utilisant la technique des réseaux bayésiens dans le cadre d'étude des incendies et de la ventilation. Ces systèmes experts ont permis de confirmer la faisabilité informatique de créer de larges bases de données et l'intérêt pour l'expertise de disposer de ce type d'outils.

La thèse s'inscrit dans le développement de méthodes et d'outils informatiques pour améliorer des bases de données simulées. Actuellement, le système expert requiert beaucoup de temps pour exploiter les données, s'appuyant actuellement sur 10 millions de points de données, correspondant à autant de simulations. Il nous faut alors découvrir et sélectionner les données jugées intéressantes en nombre suffisamment limité pour réduire le temps d'exploitation du système expert en conservant une précision correcte. Un second pan d'étude consiste à découvrir les manques dans les données simulées et les relier aux entrées les générant de façon plus précise, permettant de recommander des simulations à effectuer pour compléter les données. La question est alors : **“Comment définir le sous-ensemble minimal permettant la réduction du temps d'exécution du système expert sans perte significative de précision, et quelle méthode utiliser pour découvrir et définir les données manquantes ?”**

Pour aborder ce problème, nous testons actuellement l'entraînement de réseaux de neurones sur des sous-ensembles des données disponibles afin d'évaluer l'impact de la quantité des données fournies à ce type de modèles. Ensuite seront effectués des tests de méthodes permettant d'estimer l'apport en performances du modèle de l'ajout de sous-ensembles de données en utilisant des méthodes telles que l'active learning. Les sous-ensembles seront également caractérisés par rapport à leur apport en termes de performance, pour finir par trouver le plus petit sous-ensemble des données permettant d'atteindre une précision maximale.

Mots clés : intelligence artificielle, sélection de données, augmentation de données.

SUJET DE LA THÈSE

Gérer les compétences : entre pratiques quotidiennes et usages des dispositifs

Doctorante :	Marine TESSIER
Date du début de la thèse :	10/10/2023
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP/SHOT/LSHS
Référent IRSN de la thèse :	Audrey MARQUET
Direction de la thèse :	Christine VIDAL GOMEL/Université de Nantes & Alexandre LARGIER/IRSN
École doctorale :	Université Bretagne Loire - Éducation, Langages, Interaction, Cognition, Clinique (Elicc) - ED 603
Financement de la thèse :	IRSN

Dans une période où la relance du nucléaire est au cœur des débats politiques, et dans un contexte de tensions dans les recrutements dans la filière nucléaire le développement et la transmission des compétences font partie des questions déterminantes. Pour travailler sur ces enjeux, le laboratoire de SHS de l'IRSN a développé un axe de recherche s'intéressant au maintien et au développement des compétences dans un contexte de fort renouvellement des effectifs.

La thèse s'inscrit dans ce cadre et cherche à comprendre comment les dispositifs et les instruments de gestion des compétences sont utilisés et soutiennent ou non le développement et la transmission des compétences des acteurs de terrain. L'intérêt est de partir de l'activité des acteurs à travers leur usage et/ou leur conception de ces instruments.

Un accord de coopération avec ORANO permet de travailler sur les questions du développement, de l'acquisition et de la transmission de compétences spécifiques, dites « rares » (c'est-à-dire des compétences détenues par peu de personnes au sein d'un métier, qui sont acquises sur un temps long) relative à la polyvalence des acteurs. Il s'agit alors de comprendre comment les instruments et dispositifs de gestion de compétences soutiennent cette polyvalence.

La démarche méthodologique consiste d'abord à réaliser une recherche bibliographique concernant les notions de compétences, de dispositifs et de formation. Elle a pour objectifs de déterminer le périmètre de la thèse et d'identifier les modèles et approches pertinents. Dans la continuité, une première phase exploratoire permet de réaliser un état des lieux de la recherche à travers un travail exploratoire sur le terrain d'enquête. Différents types de méthodes seront utilisés : le recueil de document, les observations ouvertes et les entretiens semi-directifs. Une deuxième phase se focalisera sur l'analyse de l'activité des acteurs d'un métier afin de caractériser finement les compétences mises en œuvre en situation, leurs modes de transmission, et les usages des dispositifs et outils de gestion. Pour ce faire, des observations systématiques et des entretiens d'auto-confrontation seront effectués. En parallèle de ces phases, des groupes de travail avec les acteurs engagés dans la recherche (responsables FOH, acteurs observés...) seront également organisés afin de comprendre les besoins du terrain, de présenter et de discuter de l'avancée des résultats. Un livrable sera également remis à ORANO au cours de la thèse à partir de l'analyse des données et des résultats obtenus.

Mots clés : compétences, dispositifs, pratiques.