



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

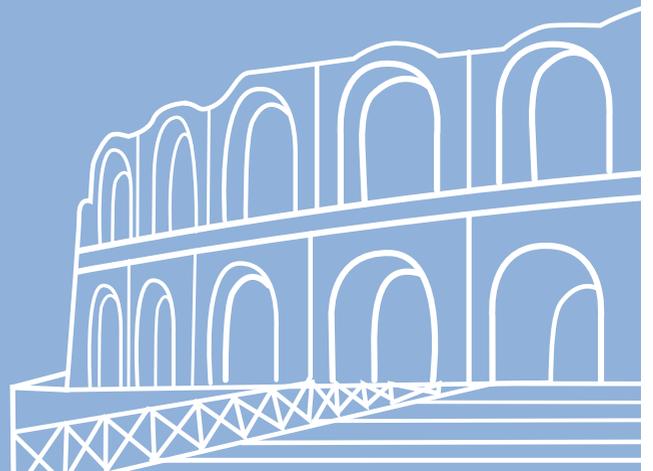
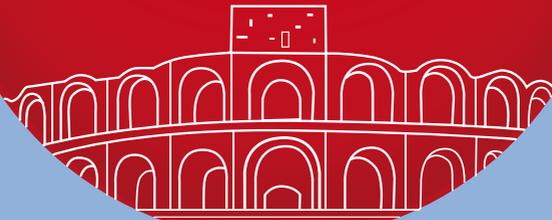
**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# LIVRET DES THÈSES 2024

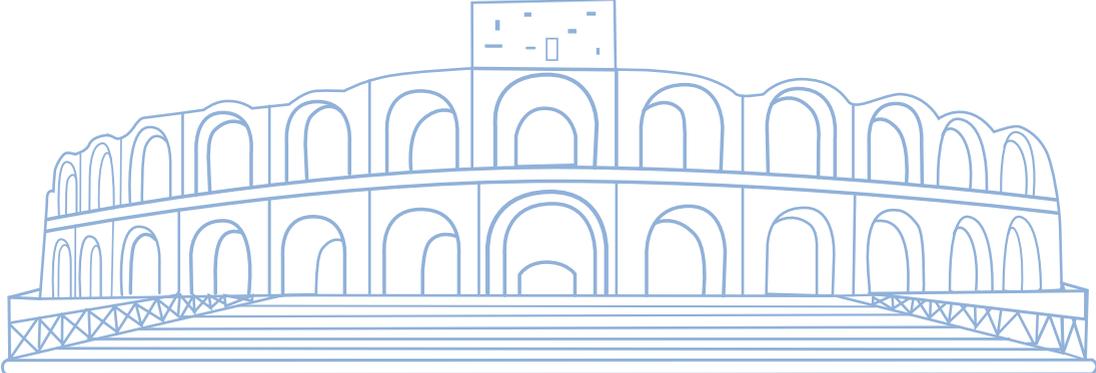
du 2 au 5 avril

**Journées  
des thèses  
2024**  
Arles



MEMBRE DE

**ETSON**

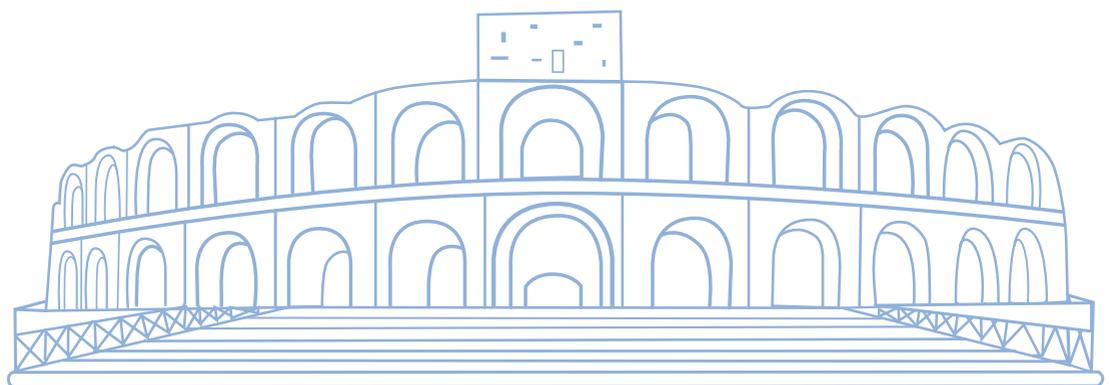


# JOURNÉES DES THÈSES 2024

Le Village Camarguais, 13200 Arles

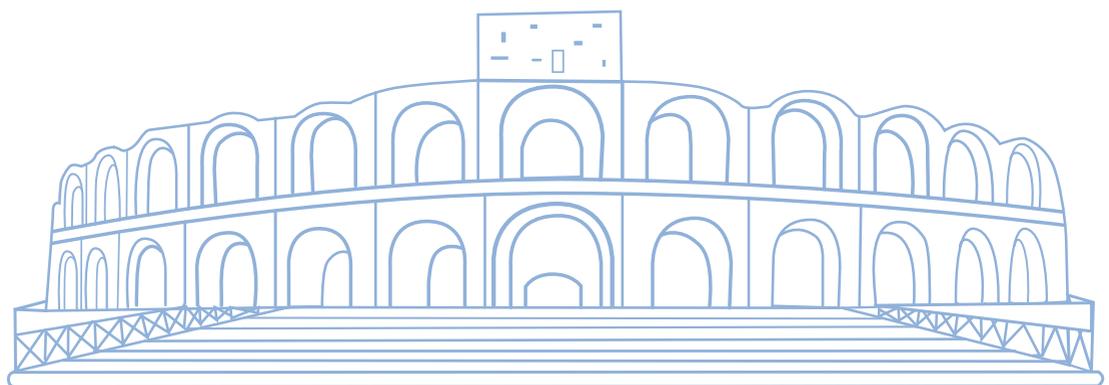
>>> 02 - 05 avril

Programme des sessions



# SOMMAIRE

|                                                                                  |              |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>&gt; PROGRAMME DES JOURNÉES DES THÈSES 2024</b>                               | P. 5 - 10    |
| <b>&gt; AU FIL DES SESSIONS</b>                                                  |              |
| - Conférences et sessions orales du mercredi 3 avril                             | P. 11 - 54   |
| - Conférences et sessions orales du jeudi 4 avril                                | P. 55 - 98   |
| - Les sessions posters                                                           | P. 99 - 132  |
| <b>&gt; SOIRÉES, VISITE ET AUTRES INFORMATIONS</b>                               | P. 133 - 140 |
| - Soirée conférence du mardi 2 avril                                             | P. 135       |
| - Soirée ADI[N] du jeudi 4 avril                                                 | P. 136       |
| - Visite commentée des anciens salins de Camargue - vendredi 5 avril             | P. 137 - 138 |
| - Et si vous déposiez un brevet ?                                                | P. 139       |
| - Devenir professionnel des doctorants de l'IRSN, générations 2017 à 2019        | P. 140 - 141 |
| - L'information scientifique et technique                                        | P. 142 - 145 |
| - Présentation de l'ADI[N]                                                       | P. 146 - 147 |
| - Présentation de l'ASTHEC                                                       | P. 148       |
| <b>&gt; LISTE DES SERVICES<br/>ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS</b> | P. 149 - 150 |



# PROGRAMME

## > Mardi 2 avril

12h00 - 14h00 > **Installation et repas**

14h00 - 16h30 Salle Gardians > **Accueil des doctorants de 1<sup>ère</sup> année - 2<sup>nd</sup> volet**

**Place de votre projet dans la recherche à l'IRSN. La science ouverte. L'intégrité scientifique et l'évaluation scientifique à l'IRSN. Construction du parcours professionnel durant la thèse plan de formation, devenir des doctorants.**

Intervenants : Didier GAY, Thierry BOURGOIS, Audrey LEGENDRE, Pascale SCANFF, Bérénice FROMENT, Pierre TISON, Irène SOROKINE-DURM, Vincent MIGNOTTE

14h00 - 16h30 Salle Manadiers > **Formation doctorants en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> années**

**Recherche responsable : Kesako ?**

Intervenante : Valérie MARCHAL

**Comment gérer ma visibilité en tant que doctorant.e ?**

Intervenantes : Audrey LEGENDRE, Karen PAYRAR

16h30 - 18h30 Place extérieure > **Activités ADi[N] de cohésion pour les doctorants**

19h00 > **Apéritif de bienvenue**

> **Ouverture des Journées Thèses par Jean-Christophe NIEL, Directeur général de l'IRSN**

19h30 > **Dîner**

20h45 Salle Marie Mauron

> **Conférence Valoriser son expérience doctorale et élaborer son projet professionnel.**

Intervenant : Vincent MIGNOTTE, Directeur de l'association Bernard Grégory

## > Mercredi 3 avril

08h15 - 9h00 Salle Marie Mauron **SESSION PLÉNIÈRE**

> **Conférence sur thématique transverse**

Page 11

**10 ans de recherche renforçant les fondements scientifiques de la loi linéaire sans seuil (LNT).**

Intervenants : Klervi LEURAUD - Cheffe du Service de recherche sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants (SESANE)

Dmitry KLOKOV - Chef du Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale (LRT0x)

09h05 - 10h20 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Fonctionnement des installations - Comportement et transfert des aérosols et des produits de fission**

Page 13

Président : **François GENSDARMES**

Docteur, spécialiste en métrologie des aérosols

**Théo ROUBILLE** - Étude de l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome en tant qu'*Advanced Technology Fuels* grâce à un nouveau potentiel interatomique à charge variable.

**Rémy PLOIX** - Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosol dans les bifurcations des réseaux de ventilation.

**Mariam SAAB** - Revaporization of Fission Products for the Delayed Source Term.

**Anis LOUCHAMI** - Calcul des force et couple hydrodynamiques sur une particule solide glissante près d'une paroi solide glissante en présence d'un écoulement de cisaillement.

09h05 - 10h30 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Métrologie des neutrons - Caractérisation neutronique et installations**

Page 19

Président: **Amokrane ALLAOUA**

Docteur en physique neutronique et instrumentations

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

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

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

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

**Pierre SOLÉ** - Traitement des incertitudes sur les données nucléaires.

10h20 - 10h45 > **Pause**

10h45 - 12h00 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Fonctionnement des installations - Écoulements fluides et réactifs**

Page 25

Président: **Hugues PRÉTREL**

Docteur en sciences de l'incendie

**Loïc PERRIN** - Étude expérimentale des écoulements induits lors d'un incendie dans une enceinte confinée et mécaniquement ventilée. Application aux scénarios d'incendie dans un milieu sous-ventilé.

**Dorian TRABICHET** - Développement d'une approche de densité de probabilité de flammelettes pour la déflagration et comparaison avec la simulation des grandes échelles.

**Florian REIN** - Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave.

**Joasma MARICHAL** - Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts avec ébullition et évaporation.

10h45 - 11h45 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Transferts - Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement - Session 1** Page 31

Président: **Hugo LEPAGE**

Docteur, spécialiste en transfert en milieu aquatique

**Etienne DUREUIL** - Caractérisation du mélange des écoulements à densité variable.

**Hanane BOUNOUAS** - Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti.

**Léonore FLIPO** - Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide / liquide de radionucléides en rivière.

12h00 - 13h15 > **Déjeuner**

13h15 - 14h30 Salle Bouvine **SESSION POSTERS**

14h30 - 15h40 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Fonctionnement des installations - Physico-chimie des aérosols et des produits de fission**

Page 35

Président: **Marc BARRACHIN**

Docteur en physique des solides

**Karim ABBAS** - Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés.

**Fouzia DJERIOUAT** - Étude de la rétention par barbotage de produits de fission avec prise en compte de l'impact d'un milieu salin.

**Mtoilibou Abdallah KEYMOON** - Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en conditions APRP ET AG.

**Mohamed Dahi M'HAYHAM** - Modélisation des spectres alpha d'aérosols radioactifs et métrologie des données d'entrée par technologie des micro-capteurs aérosol – Application aux moniteurs de radioprotection utilisés dans des atmosphères atypiques par rapport aux référentiels normatifs IEC.

14h30 - 15h35 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Accident radiologique - Aide à la prise en charge de victimes**

Page 41

Présidente: **Carmen VILLAGRASA**

Docteure en physique nucléaire

**Quentin TALLON** - Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques. Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH.

**Lucie ANCEL** - Nouveaux marqueurs moléculaires de la brûlure radiologique par approche "multi-omique".

**Mahinour MOBASHER** - Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens.

15h35 - 16h00 > **Pause**

16h00 - 17h15 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Fonctionnement des installations - Vieillessement des matériaux du réacteur**

Page 45

Présidente: **Fabienne RIBEIRO**

Docteure en chimie physique

**Apou Martial KPEMOU** - Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5Framatome après une sollicitation de type APRP.

**Kushal Gowda JAYARAM** - Understanding the mechanisms of low cycle fatigue of Alloy 690 in the PWR environment.

**Loïc CHAIX** - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié.

**Estelle LAGARDÈRE** - Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement.

16 h 00 - 16 h 50 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Transferts - Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement - Session 2** Page 51

Président : **Frédéric COPPIN**

Docteur en géosciences de l'environnement

**François GUILLORY** - Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants : *continuum* sol-rivière.

**Séléna FERRERES** - Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire.

**Meryem MEZIANE** - Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés grâce à la géostatistique non-stationnaire.

19 h 30 > **Dîner** > **Soirée libre**

## > **Jeudi 4 avril**

08 h 15 - 09 h 00 Salle Marie Mauron **SESSION PLÉNIÈRE**

> **Conférence sur thématique transverse**

**Quelle recherche à l'IRSN en soutien à l'expertise du dossier d'autorisation de création de CIGEO**

Intervenant : Christophe DEBAYLE

Adjoint au chef de Service des pollutions et des déchets radioactifs

Page 55

09 h 05 - 10 h 35 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Sciences de la terre - Modélisation des aléas naturels et de leurs impacts**

- **Analyse économique des conséquences d'un accident nucléaire**

Page 57

Présidente : **Oona SCOTTI**

Docteure en géophysique

**Nicolas CATHELIN** - Investigations paléosismologiques de la faille de Saint-Montan - Terminaison NE du faisceau de faille Cévenol.

**Antoine CHAPON** - Estimation locale et régionale des événements de pluies extrêmes dans un cadre multivarié et non-stationnaire.

**Occitane BARBAUX** - Températures maximales en France au 21<sup>ème</sup> siècle.

**Lisa MAMMARELLA** - Fault displacement hazard on principal fault rupture: probability of occurrence, slip distribution and role of surface geology.

**Rémi HANNOTEL** - Analyse macroéconomique du risque nucléaire.

09 h 05 - 10 h 15 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Santé humaine - Épidémiologie**

Page 63

Président : **François PAQUET**

Responsable de l'axe programme santé environnement

**Julie FENDLER** - Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire.

**Théo SILVESTRE** - Modélisation spatio-temporelle et outils d'IA pour l'analyse dose-réponse et la prédiction de lésions cérébrales et de troubles cognitifs radio-induits chez des patients traités par radiothérapie pour un glioblastome.

**Afi HENYOH** - Relations entre l'exposition résidentielle au radon au début de la vie et les effets sur la santé à l'âge adulte, au sein de la cohorte CONSTANCES.

**Yanis HAZEM** - Phénomènes de haute énergie dans les systèmes orageux et étude dosimétrique.

10h15 - 10h50 > Pause

10h50 - 11h45 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Santé environnement - Populations sur site contaminés**

Page 69

Président: **Jean-Marc BONZOM**

Docteur en radioécologie

**Léa DASQUE** - Étude des effets de la radiocontamination de l'environnement sur l'écophysiologie d'un amphibien, la rainette arboricole.

**Pierre TECHER** - Étude intégrative des effets des rayonnements ionisants sur la valeur sélective et la fonction écologique d'un consommateur secondaire planctonique.

**Elen GOUJON** - Identification de marqueurs moléculaires de la radiation à faibles doses à partir de données mutli-omiques.

10h50 - 11h55 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

> **Médecine - Expositions médicales - séquelles de radiothérapies**

Page 73

Présidente: **Agnès FRANÇOIS**

Docteure en physiologie / physiopathologie

**Sarmini BAVANANTHAN** - Réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire lors d'une irradiation pulmonaire en conditions stéréotaxiques : focus sur les cellules club.

**Claire LAGO** - Réponse de l'endothélium vasculaire à l'irradiation *in vivo* : intérêt pour la prédiction du risque de toxicité après radiothérapie.

**Arthur THOMAS-JOYEUX** - La réponse aux dommages de l'ADN dans le maintien de la stabilité myotubulaire après exposition aux rayonnements ionisants.

**Anne-laure POULIET** - Thérapie cellulaire par les cellules souches mésenchymateuses (CSM) des atteintes tissulaires de la vessie après radiothérapie.

12h00 - 13h15 > Déjeuner

13h15 - 14h30 Salle Bouvine **SESSION POSTERS**

14h30 - 15h45 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

> **Fonctionnement des installations - Perméabilité des ouvrages**

Page 79

Président: **Mejdi NEJI**

Docteur en physico-chimie des matériaux

**Omar NAJJAR** - Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave.

**Kayani GANESHALINGAM** - Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz dans les argilites.

**Maiwenn HUMBEZI DESFEUX** - Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz en cas de colis défectueux lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux.

**Mohamed Haythem BAHLOULI** - Coupled Modeling of Water-Gas Flow and Hydro-Mechanics in a Deep Geological Repository for Radioactive Waste.

14 h 30 - 15 h 30 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

➤ **Santé ENVIRONNEMENT - Radiotoxicologie**

Page 85

Président: **François PAQUET**

Responsable de l'axe programme santé environnement

**Théo FRÉCHARD** - Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale *in vivo* chez le rat.

**Margot CREVET** - Évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles domestiques (*Apis mellifera*), de la molécule à la population.

**Florian SALIOU** - Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de pathologies cardiovasculaires dans l'axe cœur-poumon.

15 h 30 - 16 h 00 ➤ **Pause**

16 h 00 - 17 h 25 Salle Marie Mauron **SESSION PARALLÈLE**

➤ **Fonctionnement des installations - Pathologie et surveillance du béton**

Page 89

Présidente: **Fabienne RIBEIRO**

Docteure en chimie physique

**Lucie GOMEZ** - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradation des granulats au cours d'une réaction alcali-granulats.

**Rita TABCHOURY** - Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons.

**Rémy HOARAU BELKHIRI** - Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme.

**Klayne DOS SANTOS SILVA** - Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE.

16 h 00 - 16 h 50 Salle Manadiers **SESSION PARALLÈLE**

➤ **Médecine - Expositions médicales et effets des rayonnements**

Page 95

Président: **Guillaume PHAN**

Pharmacien et docteur en physico-chimie et pharmacotechnie

**Alexandre PIGNARD** - Optimisation de la radiothérapie interne vectorisée avec le <sup>177</sup>Lu-PSMA pour le cancer métastatique de la prostate résistant à la castration : quelle méthode pour une estimation personnalisée de la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque ?

**Sabine LAM** - Étude de la complexation des ions lanthanides avec les acides hydroxamiques et picoliniques pour des applications en médecine nucléaire.

**Mélessandre GOMOT** - Irradiations médicales à faible dose et carcinogénèse du côlon.

19 h 00 ➤ **Clôture des journées des thèses** - Remise du prix poster

19 h 30 ➤ **Dîner**

21 h 00 ➤ **SOIRÉE ADi[N]**

➤ **Vendredi 5 avril**

08 h 15 ➤ **Départ** vers la gare pour ceux qui ne participent pas à la visite.

08 h 30 ➤ **Visite des Anciens salins de Camargue** avec **Marc Thibault**,

Page 137 - 138

Chef de projet Gestion et restauration de zones humides, expert de la Tour du Valat.  
(sur inscription, nombre de places limité); Retour prévu en fin de matinée.

> Mercredi 3 avril

08 h 15 - 09 h 00 Salle Marie Mauron

## SESSION PLÉNIÈRE

### > CONFÉRENCE SUR THÉMATIQUE TRANSVERSE

# 10 ans de recherche renforçant les fondements scientifiques de la loi linéaire sans seuil (LNT)

Intervenants :

Klervi LEURAUD - Cheffe du Service de recherche sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants (SESANE)

Dmitry KLOKOV - Chef du Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale (LRTOx)

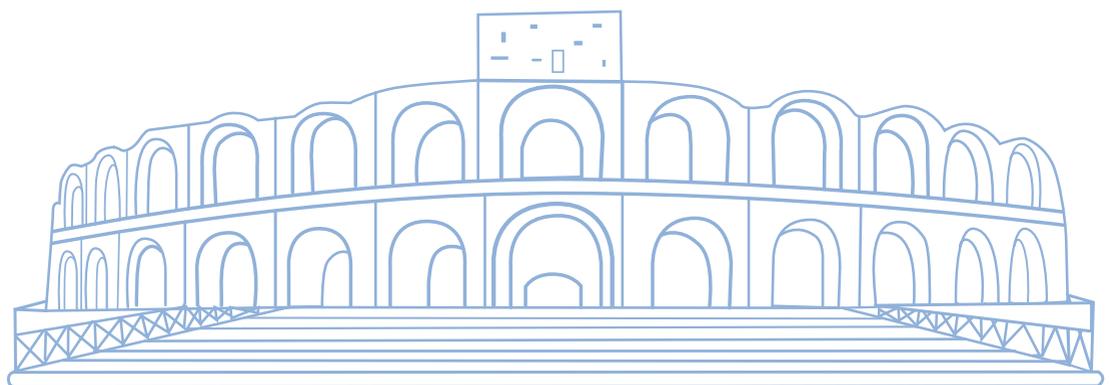
Dans le domaine de la radioprotection, le modèle de la loi linéaire sans seuil (ou LNT) suppose une relation directement proportionnelle entre la dose de rayonnements ionisants reçue par une personne et le risque de cancer et qu'il n'y a pas de valeur de dose en dessous de laquelle ce risque serait nul. Ce modèle a été introduit dans le système de radioprotection il y a environ 60 ans, mais sa validité pour estimer le risque de cancer aux faibles doses et débits de dose et son utilisation en radioprotection font encore aujourd'hui l'objet de discussions animées.

Pour contribuer à ces discussions, l'IRSN a publié en décembre dans le *Journal of Radiological Protection* son point de vue sur le modèle LNT. Cet article s'appuie sur un travail de synthèse de l'état actuel des connaissances sur les effets de l'exposition aux rayonnements ionisants en radiobiologie et en épidémiologie, résultats des recherches réalisées au cours de la dernière décennie. Il discute également de l'utilisation du modèle LNT pour évaluer les risques de cancer suite à une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, en support au système de radioprotection. Pour accompagner ce travail, l'IRSN a mis en place une consultation pluridisciplinaire interne qui visait à identifier, documenter et éventuellement résoudre les controverses sur le modèle LNT entre chercheurs et experts dans le domaine des risques associés aux rayonnements et de la radioprotection appliquée.

L'article résume les résultats en radiobiologie et en épidémiologie accumulés au cours de la dernière décennie sur les effets d'une exposition aux rayonnements ionisants à faible Transfert d'Énergie Linéique (TEL) et discute de leur impact sur l'utilisation du modèle LNT dans l'évaluation des risques de cancer par rayonnement à faibles doses. Les connaissances acquises au cours des 10 dernières années, tant en radiobiologie qu'en épidémiologie, ont renforcé les fondements scientifiques sur les risques de cancer à faibles doses.

La démarche adoptée et les conclusions principales de l'article vous seront exposées dans la conférence présentée par Klervi Leuraud, docteure en épidémiologie et cheffe du Service de recherche sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants, et Dmitry Klovov, docteur en biologie et chef du laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale.

Ref : « Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection » D. Laurier, Y. Billarand, D. Klovov et K. Leuraud, in *Radioprotection* 2023, 58(4), 243–260 <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023036>.



> Mercredi 3 avril

09 h 05 - 10 h 20 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> **FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Comportement et transfert des aérosols et des produits de fission**

**Président: François GENSDARMES**

Docteur, spécialiste en métrologie des aérosols

**Théo ROUBILLE** - Étude de l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome en tant qu'*Advanced Technology Fuels* grâce à un nouveau potentiel interatomique à charge variable.

**Rémy PLOIX** - Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosol dans les bifurcations des réseaux de ventilation.

**Mariam SAAB** - Revaporization of Fission Products for the Delayed Source Term.

**Anis LOUCHAMI** - Calcul des force et couple hydrodynamiques sur une particule solide glissante près d'une paroi solide glissante en présence d'un écoulement de cisaillement.

## SUJET DE LA THÈSE

### Étude de l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome en tant qu'*Advanced Technology Fuels* grâce à un nouveau potentiel interatomique à charge variable.

|                             |                                                                |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Théo ROUBILLE                                                  |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SAM/LETR                                               |
| Référent IRSN de la thèse : | Roland DUCHER                                                  |
| Direction de la thèse :     | Yves PIPON/Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL)       |
| École doctorale :           | Lyon COMUE - Physique et astrophysique de Lyon (PHAST) - ED 52 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & Framatome                                               |

---

Le dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) dopé à l'oxyde de chrome (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui fait partie des nouveaux concepts de combustible (*Advanced Technology Fuels*-ATF) pour les centrales nucléaires, a été développé pour améliorer la performance du combustible en fonctionnement normal et en conditions accidentelles, notamment dans les situations d'une perte de réfrigérant primaire (APRP).

Le but de cette étude est d'examiner l'impact du chrome sur la diffusion de deux produits de fission (PF) (Cs et Mo), connus pour leur influence sur la chimie du combustible et, en cas de relâchement en conditions accidentelles, sur le transport de l'iode dans le circuit primaire. L'étude est conduite à l'échelle atomique en utilisant des calculs de dynamique moléculaire avec le code LAMMPS. Ils requièrent l'optimisation de potentiels pour décrire l'interaction entre les atomes dans le combustible. Une nouvelle version du potentiel SMTB-Q<sup>(1)</sup>, a été développée notamment pour garantir une électro-négativité à l'échelle locale, plutôt qu'une électro-négativité globale comme c'était le cas avec le potentiel précédent.

Nous avons d'abord validé le modèle SMTB-QB pour l'UO<sub>2</sub> non dopé en comparant ses prédictions avec des données expérimentales et des données ab initio obtenues à partir de la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT), sur des propriétés telles que la chaleur spécifique ou l'énergie de formation des défauts chargés dans l'UO<sub>2</sub> stœchiométrique et non stœchiométrique. Ensuite, nous avons réalisé une analyse comparative de la diffusion de l'oxygène et de l'uranium dans l'UO<sub>2</sub> non dopé et l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome.

La dernière partie de ce travail consistera à étudier la diffusion des produits de fission d'intérêt (Mo et Cs) dans l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome en déterminant leurs chemins de migration préférentiels et les coefficients de diffusion associés. Les résultats devraient contribuer à comprendre si la diffusion des PF est accélérée par la présence de chrome dans la matrice combustible. In fine, les coefficients de diffusion ainsi déterminés seront utilisés comme données d'entrée pour adapter le code MFPR-F à l'UO<sub>2</sub> dopé au chrome.

**Mots clés :** LAMMPS, dynamique moléculaire, ATF, UO<sub>2</sub> dopé chrome.

(1) G. Sattonnay and R. Tétot, J. Phys.: Condens. Matter 25 (2013).

## SUJET DE LA THÈSE

### Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosol dans les bifurcations des réseaux de ventilation

|                             |                                                                        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Rémy PLOIX                                                             |
| Date du début de la thèse : | 01/11/2021                                                             |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SCA/LEMAC                                                      |
| Référent IRSN de la thèse : | Jeanne MALET                                                           |
| Direction de la thèse :     | Evelyne GEHIN/Université Paris Sud Orsay & Jeanne MALET/IRSN           |
| École doctorale :           | COMUE Paris Est - Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE) - ED 531 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne                       |

Ce travail entre dans le cadre du programme DEPART, visant à fournir aux chargés d'évaluation de l'IRSN des outils permettant de quantifier et de localiser le dépôt dans les réseaux de ventilation industriels. Cette quantification passe par l'utilisation de modèles, qui n'existent pas dans la littérature pour certaines singularités, dont la bifurcation. L'objectif de cette thèse est donc de proposer un outil permettant d'estimer le dépôt engendré par une bifurcation en configuration de mélange. La démarche consiste à réaliser des comparaisons code-expérience entre des mesures de dépôt local sur l'installation DIESE, et les simulations numériques avec le code CFD Fluent.

En 2023, huit essais ont été réalisés avec quatre rapports de débits, trois tailles de particules et trois géométries de bifurcation. Les mesures de dépôt local ont été complétées par des mesures de profils de vitesses dans les trois branches de la bifurcation. D'autre part, trois maillages ont été proposés avec différentes tailles de mailles au centre de la gaine et un raffinement en paroi identique ( $y^+=1$ ). Les calculs d'écoulement sont réalisés avec les modèles de turbulence  $k-\omega$  SST et RSM. La modélisation des particules est réalisée avec le modèle lagrangien stochastique (EIM).

Des profils de vitesses moyennes ont été comparés entre le code et l'expérience. Ils sont similaires tant pour l'allure du profil transverse en aval de la bifurcation, que pour le profil en paroi. Des calculs de suivi de particules sont réalisés sur les configurations d'écoulement, avec six tailles de particules monodisperses. Le dépôt surfacique local sur des zones identiques à l'expérience est étudié, et permet différentes observations :

- 1 - La bifurcation entraîne une augmentation du dépôt en aval de la singularité ; ce dépôt est dissymétrique dans la gaine.
- 2 - Les trois rapports de débit étudiés ont un impact minime sur le dépôt.
- 3 - La géométrie de la bifurcation a un impact important, en particulier la bifurcation avec des arêtes saillantes qui engendre un dépôt plus hétérogène qu'une bifurcation aux angles arrondis. Ceci rejoint les observations faites sur les coudes arrondis et saillants (Costa 2022).

La suite des travaux de thèse sera consacrée à la réalisation d'une étude paramétrique numérique pour compléter les quatorze calculs déjà réalisés, en ajoutant des calculs d'écoulement sur trois autres rapports de débits et deux autres géométries. Quatre diamètres d'aérosol supplémentaires seront également étudiés. Cette étude permettra ainsi de proposer un outil d'estimation du dépôt dans une bifurcation de grande taille.

**Mots clés :** aérosol, dépôt, bifurcation, CFD, Lagrangien, Stochastique, ventilation, DIESE.

SUJET DE LA THÈSE

Revaporization of Fission Products for the Delayed Source Term

|                             |                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Mariam SAAB                                                   |
| Date du début de la thèse : | 15/03/2022                                                    |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SAM/LETR                                              |
| Référent IRSN de la thèse : | Sidi SOUVI                                                    |
| Direction de la thèse :     | Monica CALATAYUD-ANTONINO/Sorbonne Université                 |
| École doctorale :           | Chimie physique et chimie analytique de Paris Centre - ED 388 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & EDF                                                    |

---

Our study delves into nuclear safety, specifically examining behavior of Cesium and Molybdenum within the reactor cooling system (RCS) in case of Severe Accident, regarding their contribution to the Delayed Source Term in the frame of long-term accident management. The primary objective is to enhance the thermodynamic modeling of Cs-Mo complexes, with emphasis on understanding how surface reactivity impacts both gaseous and deposited phases. This understanding is crucial for explaining the disappearance of specific complexes and observed growth of deposits. Our study delves into the surface reactivity of deposited MoO<sub>3</sub> and its influence on the gaseous CsHMoO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> complexes. We aim to investigate the disappearance of these complexes upon the interaction with the surface and explore the underlying mechanism of MoO<sub>3</sub> growth observed in CHIP and CHIP+ programs. The thermodynamic data will be integrated into the Sophaeros module, augmenting the database. Additionally, we aim to capture the impact of RCS on MoO<sub>3</sub> surface by considering temperature, atmosphere, and potential O-vacancy formation.

To explore the surface reactivity, we conducted ab-initio Density Functional Theory (DFT) calculations. The goal was to determine the Gibbs energy associated with the adsorption and dissociation of these complexes as function of temperature. Subsequently, we verified whether these processes occurred within the same temperature range. Additionally, we calculated the Gibbs energy of adsorption for O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O. These values were utilized in determining the equilibrium constants, which were employed in the analytical expressions used to construct isotherms. These isotherms were represented at 800K, corresponding to deposition temperature of MoO<sub>3</sub>.

Our findings reveal that CsHMoO<sub>4</sub> doesn't contribute to the surface growth of MoO<sub>3</sub> as its dissociation is unattainable on both surfaces. In contrast, H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, adsorbed on Mo-terminated surface within the 600-800K temperature range, plays a crucial role, underscoring its contribution to the growth of deposited MoO<sub>3</sub> at this temperature. The resulting thermodynamic data have been incorporated into the Sophaeros module of the ASTEC code developed by IRSN, and their impact will be demonstrated through profiles of gaseous, aerosol, and condensed phases of Cs-Mo main species. However, simulations are still ongoing in the code. Considering the impact of various conditions, it is noteworthy that the temperature at which MoO<sub>3</sub> deposits will not result in the creation of O-vacancy. Under oxidizing conditions, the surface remains unaffected since water and O<sub>2</sub> adsorptions are impossible. However, under reducing conditions, H-adsorption is possible and may lead to potential O-vacancy formation, although further investigation is needed for confirmation.

**Mots clés :** DFT, SOPHAEROS, MoO<sub>3</sub> growth, surface reactivity.

## SUJET DE LA THÈSE

### Calcul des force et couple hydrodynamiques sur une particule solide glissante près d'une paroi solide glissante en présence d'un écoulement de cisaillement

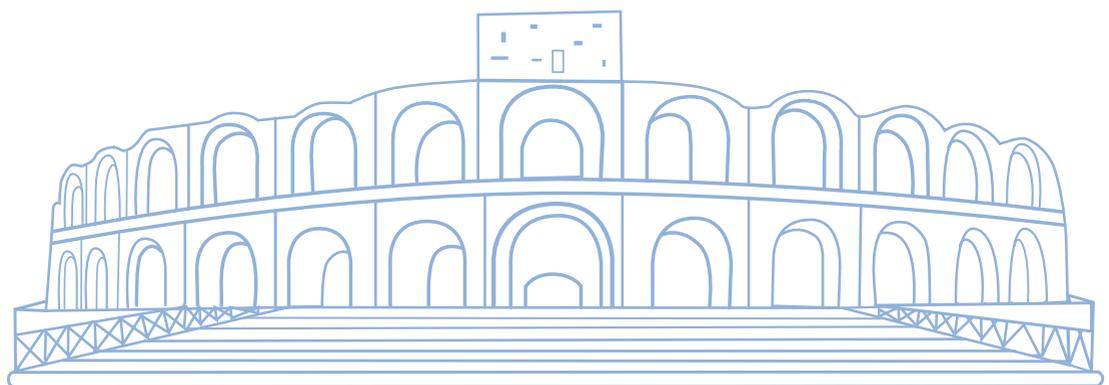
|                             |                                                        |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Anis LOUCHAMI                                          |
| Date du début de la thèse : | 16/01/2023                                             |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SCA/LPMA                                       |
| Référent IRSN de la thèse : | François GENSDARMES                                    |
| Direction de la thèse :     | Antoine SELLIER/École Polytechnique, LadHyX            |
| École doctorale :           | Institut Polytechnique de Paris (ED IP PARIS) - ED 626 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                   |

Cette thèse est motivée par le problème de la remise en suspension de poussières solides microniques près d'une paroi plane sous l'action d'un écoulement de gaz à basse pression. Ce phénomène est rencontré en particulier lors d'un accident de perte de vide (scénario LOVA) dans le futur réacteur nucléaire de fusion ITER. Lors d'un tel scénario, une particule isolée est soumise à un écoulement d'air à basse pression qu'exerce sur elle une force et un couple. Ces derniers sont actuellement calculés (et utilisés dans les codes de remise en suspension) en ignorant le glissement de la paroi et de la particule. Cette thèse étudie comment prendre en compte ces glissements pour quantifier leurs effets lorsque l'écoulement d'air est proche de la paroi et soumis à un écoulement de cisaillement.

Le cadre adopté est celui des écoulements de Stokes (petit nombre de Reynolds) et de la condition de glissement de Navier tant sur le paroi que sur la surface de la particule. Dès lors, la force et le couple appliqués sur la particule seront obtenus en calculant sur la surface de cette dernière la vitesse de l'écoulement perturbé et la contrainte surfacique. Ces grandeurs sont gouvernées par des équations intégrales sur la frontière de la particule. A ce stade, les points suivants ont été traités durant la première année de thèse :

- l'établissement des équations intégrales pilotant sur la surface de la particule, la vitesse et la contrainte surfacique. Ces équations impliquent un tenseur de Green des vitesses et un tenseur de Green des contraintes  $T$  associé. Le tenseur  $G$  est celui qui assure le glissement de Navier sur la paroi plane;
- le calcul analytique et numérique des deux tenseurs  $G$  et  $T$ ;
- la résolution asymptotique des équations intégrales pour une particule située loin de la paroi (par rapport à sa taille).

**Mots clés :** TOKAMAK, remise en suspension de poussières, accident de perte de vide, particules, force et couple hydrodynamiques, équations de Stokes, glissement de Navier.



> Mercredi 3 avril

09 h 05 - 10 h 30 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

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

**Président: Amokrane ALLAOUA**

Docteur en physique neutronique et instrumentations

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

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

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

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

**Pierre SOLÉ** - Traitement des incertitudes sur les données nucléaires.

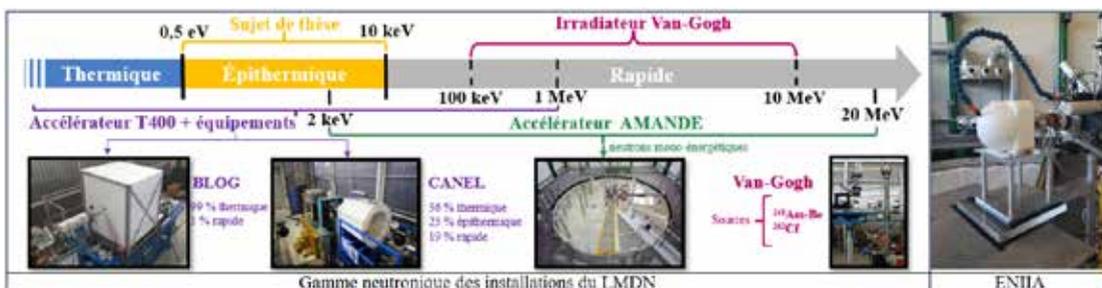
## SUJET DE LA THÈSE

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

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

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

**Mots clés :** neutrons, détection, instrumentation, métrologie.



## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes

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

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

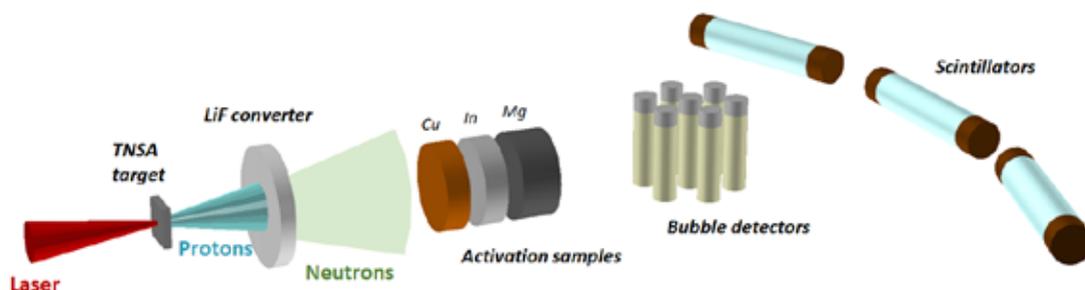
**Mots clés :** neutrons, laser, détection, activation.

Références

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

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

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



## SUJET DE LA THÈSE

DéTECTEURS DIAMANTS ULTRA-MINCES POUR LE MONITORAGE EN LIGNE  
DE MICROFAISCEAUX D'IONS

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

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

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

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

Cependant, la gravure du matériau diamant n'est pas tâche aisée. Les techniques existantes utilisent un plasma bombardé sur la surface du diamant, permettant de le graver avec des vitesses atteignant quelques micromètres par heure. En particulier, la technique de Reactive Ion Etching (RIE), développée à l'Institut Néel pour la gravure du diamant utilise un mélange de gaz CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> permettant d'atteindre la vitesse de 4,8 μm/h. Cette technique doit être adaptée pour la gravure profonde : l'utilisation d'un masque diamant polycristallin protégeant les zones à ne pas graver permet d'obtenir les motifs carrés et circulaires des fenêtres de détection. Un processus de fabrication, associant également des caractérisations portant sur la qualité de surface et l'épaisseur à différentes étapes de la gravure a été mis en place. Suivant celui-ci, un premier prototype est en cours de réalisation.

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

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

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

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

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

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

**Mots clés :** scintillateur, neutron, métrologique, Stilbene.

## SUJET DE LA THÈSE

## Traitement des incertitudes sur les données nucléaires

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

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

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

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

Mon programme se décompose en plusieurs axes clés :

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

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

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

> Mercredi 3 avril

10 h 45- 12 h 00 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

##### > FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Écoulements fluides et réactifs

**Président: Hugues PRÉTREL**

Docteur en sciences de l'incendie

**Loïc PERRIN** - Étude expérimentale des écoulements induits lors d'un incendie dans une enceinte confinée et mécaniquement ventilée. Application aux scénarios d'incendie dans un milieu sous-ventilé.

**Dorian TRABICHET** - Développement d'une approche de densité de probabilité de flammes pour la déflagration et comparaison avec la simulation des grandes échelles.

**Florian REIN** - Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave.

**Joasma MARICHAL** - Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts avec ébullition et évaporation.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale des écoulements induits lors d'un incendie dans une enceinte confinée et mécaniquement ventilée.

## Application aux scénarios d'incendie dans un milieu sous-ventilé

|                             |                                                                                                                |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Loïc PERRIN                                                                                                    |
| Date du début de la thèse : | 01 / 09 / 2022                                                                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SA21/LEF                                                                                               |
| Référent IRSN de la thèse : | Hugues PRETREL                                                                                                 |
| Direction de la thèse :     | Olivier VAUQUELIN / Aix Marseille Université                                                                   |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & ENS Paris Saclay                                                                                        |

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des recherches menées sur le risque incendie dans les installations nucléaires. Les configurations expérimentales considèrent, dans un objectif de représentativité des scénarios, des environnements confinés et ventilés mécaniquement ainsi que des régimes de combustion sous-oxygénés. L'objectif est la compréhension et la description des écoulements régissant la stratification des gaz et l'alimentation en oxygène du foyer en milieu sous-oxygéné. A terme, l'objectif est l'amélioration des connaissances et du potentiel prédictif des outils de simulation de l'IRSN (Sylvia, CALIF3S-ISIS) pour des configurations complexes rencontrées lors d'un incendie en milieux sous-oxygénés.

Les travaux sont effectués dans le dispositif STYX du Laboratoire d'Expérimentation des Feux dans lequel est mis en place un système de métrologie avancée, non intrusif, et innovant au regard des configurations étudiées. En effet, en se basant sur les acquis du laboratoire, une Vélocimétrie laser par Image de Particule (PIV) a été déployée afin de caractériser le champ de vitesse des écoulements de fumée (panache, écoulement sous plafond) puis servira prochainement à l'étude des interactions entre les fumées réparties dans un local et les systèmes de ventilation, et ensuite à celle des écoulements d'alimentation en champ proche du foyer. Parallèlement, les études comprennent une approche théorique de modélisation d'une partie des écoulements d'intérêt s'appuyant sur la littérature existante et l'interprétation des résultats expérimentaux.

Au cours de la première année, les travaux d'application de la PIV pour l'étude élémentaire des écoulements dans le dispositif STYX pour un foyer de bac d'éthanol, faiblement émetteur de suies, ont permis de confirmer l'adéquation de la technique de mesure avec les objectifs envisagés pour la thèse. Plusieurs structures aérauliques cohérentes et caractéristiques des foyers confinés ont été identifiées et caractérisées vis-à-vis de la puissance du foyer. Ces résultats ont été valorisés au travers d'une présentation lors d'un symposium et d'un article de conférence publié dans le Fire Safety Journal. Conséquemment, la seconde étude sur les écoulements d'admission d'air frais en partie supérieure des compartiments incendiés a démarré avec la modification du dispositif STYX pour générer un jet d'air vertical à travers un environnement stratifié thermiquement ; en addition aux travaux sur la modélisation analytique des panaches et fontaines dans les milieux stratifiés basée sur des équations de conservation d'un écoulement unidimensionnel turbulent et miscible dans son milieu.

**Mots clés :** écoulement, incendie, PIV, feu.

SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une approche de densité de probabilité de flammelettes pour la déflagration et comparaison avec la simulation des grandes échelles

|                             |                                                                                                  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Dorian TRABICHET                                                                                 |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SA2I/LIE                                                                                 |
| Référent IRSN de la thèse : | Laura GASTALDO                                                                                   |
| Direction de la thèse :     | Denis VEYNANTE/École Centrale de Paris & Laura GASTALDO/IRSN                                     |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences - ED 579 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                             |

L'IRSN s'intéresse à l'étude des risques d'incendie et d'explosion dans les installations industrielles classiques et nucléaires. Pour cela, le laboratoire de l'incendie et des explosions (LIE) développe des solutions pour la simulation numérique de tels évènements. Parmi elles, le logiciel CALIF3S est dédié à la simulation de différents types d'écoulements, turbulents réactifs tels que les flammes de diffusion, correspondant à l'incendie, et les flammes de prémélange, correspondant aux explosions.

Deux approches sont disponibles pour modéliser la turbulence. L'approche statistique RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) est la plus utilisée compte-tenu des contraintes des applications industrielles. Bien qu'économique, cette méthode s'est souvent révélée imprécise. L'approche LES (Large Eddy Simulation) est plus prédictive mais plus coûteuse en temps de calcul et vient le plus souvent en soutien de la première. Différents modèles de combustion sont disponibles, notamment un modèle dit de flammelettes qui est en cours de développement pour l'incendie.

La thèse s'articule en deux volets distincts. Le premier volet concerne la modélisation de la turbulence. L'objectif est, dans un souci de compromis entre bonne prédiction du modèle et temps de calcul modéré, de développer une stratégie dite hybride intégrant dans un même système d'équations de bilan les approches RANS et LES. Le deuxième volet concerne la combustion. L'objectif est d'étendre le modèle de flammelettes à l'explosion afin de pouvoir traiter les scénarii d'accident au cours desquels les deux types de flammes peuvent coexister.

Au cours de la première année, différents calculs LES de déflagrations accélérées ont été réalisés grâce au supercalculateur IRENE du CEA. Les résultats obtenus serviront de référence pour valider l'approche hybride pour la déflagration. Ensuite, une approche hybride originale a été développée en s'inspirant de l'approche DES (Detached Eddy Simulation). L'objectif du modèle est de réaliser un échange entre les énergies cinétiques turbulentes résolue et modélisée à l'interface RANS/LES afin d'obtenir une transition rapide d'un mode à l'autre. L'échange d'énergie est obtenu par l'ajout de termes sources/puits dans les équations moyennées/filtrées de l'écoulement. Pour pouvoir être utilisé dans des configurations instationnaires, le modèle développé intègre notamment une estimation de l'énergie cinétique turbulente moyenne via un filtrage de l'écoulement instantané. L'obtention d'un tel filtrage n'est pas directe dans un écoulement instationnaire, tels que ceux d'intérêt, et plusieurs opérateurs moyennes ont été envisagés. Différents tests sur des configurations non réactives ont permis d'exhiber le potentiel de l'approche. Cette approche sera par la suite étendue au cas réactif.

**Mots clés :** explosion, méthodes hybrides RANS/LES, modèle de flammelettes.

SUJET DE LA THÈSE

Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d’un réacteur nucléaire en situation d’accident grave

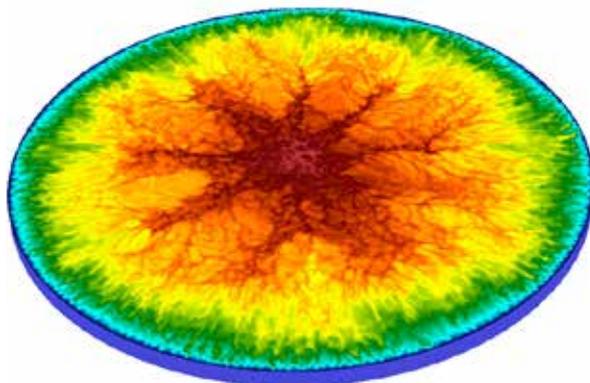
|                             |                                                                                                                |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Florian REIN                                                                                                   |
| Date du début de la thèse : | 04/10/2021                                                                                                     |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SAM/LEPC                                                                                               |
| Référent IRSN de la thèse : | Laure CARENINI                                                                                                 |
| Direction de la thèse :     | Michael LE BARS/Aix Marseille Université                                                                       |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353 |
| Financement de la thèse :   | EDF & CEA                                                                                                      |

Lors d'un accident grave dans un réacteur nucléaire, les matériaux fondus (mélange appelé corium) se relocalisent dans le fond de la cuve et peuvent conduire à sa rupture. L'évaluation des transferts de chaleur dans le corium et plus particulièrement dans la couche de métal qui peut se former à sa surface est donc de première importance, notamment lorsqu'une stratégie de rétention du corium en cuve est adoptée. L'objectif de la présente thèse est d'étudier les mouvements convectifs dans cette couche de métal chauffée par le bas et refroidie sur sa surface latérale et dans une moindre mesure sur la surface supérieure. Celle-ci repose sur trois approches complémentaires.

Tout d'abord, des simulations numériques 3D DNS (Direct Numerical Simulation, toutes les échelles de la turbulence sont résolues), ont été réalisées avec le code NEK5000. Ensuite, la création et l'utilisation d'un banc expérimental (cylindre de 44cm de rayon et 11cm de hauteur) avec comme simulant du SF<sub>6</sub>, ont permis, tout en ayant un nombre de Prandtl représentatif du métal (0,7), d'atteindre des nombres de Rayleigh plus importants ( $Ra=5e9$ ). L'approche expérimentale permet également d'acquérir des mesures à temps longs, utiles pour étudier statistiquement les fluctuations du système. Enfin, des analyses théoriques de l'écoulement ont été réalisées. Deux régimes asymptotiques sont identifiés en fonction de la condition limite à la surface du bain : lorsque l'on s'approche d'une condition adiabatique, une boucle de convection naturelle s'établit due au refroidissement latéral, en revanche lorsqu'une part significative de la puissance est extraite par la surface supérieure, une convection de type Rayleigh-Bénard s'établit dans le système.

Dans le cas général, le système étudié correspond à une superposition de ces deux régimes, conduisant à une inhomogénéité radiale. Un nouveau modèle 1D pour le profil radial de température a été développé et permettra une amélioration des modèles utilisés dans les codes accident grave comme le code

ASTEC développé à l'IRSN. Par ailleurs, les fluctuations du flux de chaleur latéral ont été étudiées et révèlent une instabilité pouvant conduire à des flux transitoires significativement plus élevés dont l'impact sur les évaluations de sûreté devra être évalué.



**Mots clés :** convection, transfert de chaleur, accident grave.

SUJET DE LA THÈSE

Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts  
avec ébullition et évaporation

|                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Doctorante :                | Joauma MARICHAL                  |
| Date du début de la thèse : | 01/11/2020                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEMIA/LSMA               |
| Référent IRSN de la thèse : | Pierre RUYER                     |
| Direction de la thèse :     | Pierre RUYER/IRSN                |
| École doctorale :           | Université Catholique de Louvain |
| Financement de la thèse :   | Université Catholique de Louvain |

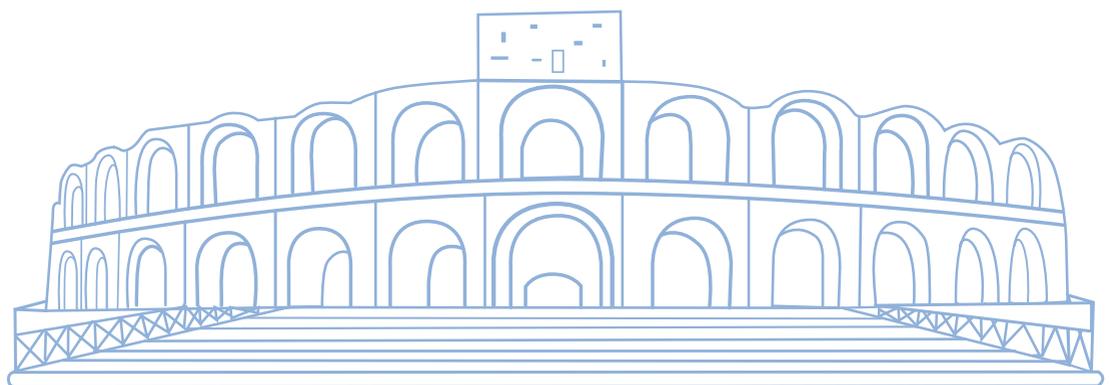
Le projet a pour objectif de faire progresser l'état de l'art dans la modélisation et simulation des transferts de masse et de chaleur au sein d'un bassin, en configuration de convection naturelle et en présence de changement de phase. Ce problème est notamment en jeu lors de l'étude des situations accidentelles de perte de refroidissement des piscines de stockage du combustible. Dans cette situation, la chaleur du combustible usé chauffe et évapore progressivement l'eau du bassin. L'analyse des démonstrations de sûreté correspondantes ont révélé l'intérêt de la modélisation des phénomènes d'évaporation et d'ébullition au sein du bassin. Les limitations des connaissances scientifiques sur ces phénomènes dans de grands bassins ont motivé un programme de recherche à l'IRSN alliant des travaux expérimentaux et de modélisation.

Les travaux de ce projet, réalisés hors du cadre de la programmation de l'Institut, apportent des éléments complémentaires basés sur le développement d'un outil logiciel permettant de décrire finement les phénomènes au sein du bassin. Le projet est divisé en 4 étapes. La première s'intéresse à la convection naturelle turbulente avec une surface libre au sommet de la géométrie. Ensuite, les étapes 2 et 3 consistent au développement et à la réalisation de simulations numériques permettant de tenir compte de l'ébullition et de l'évaporation respectivement et indépendamment l'un de l'autre. Finalement, nous effectuerons des simulations de convection avec simultanément de l'évaporation et de l'ébullition. Cela permettra de se rapprocher de la réalité des piscines de désactivation nucléaire lors d'accidents de perte de refroidissement.

Dans un premier temps, nous détaillerons l'approche Eulérienne-Lagrangienne utilisée afin de modéliser des bulles de vapeurs au sein de notre écoulement. Nous détaillerons ensuite la procédure de validation suivie, impliquant la dynamique des bulles isolées, le couplage entre les deux phases ainsi que la convection naturelle. La structure générale de l'écoulement, le nombre de Nusselt ainsi que les statistiques turbulentes de l'écoulement seront analysées pour différentes propriétés de bulles.

Par la suite, nous nous intéresserons aux phénomènes d'évaporation pouvant avoir lieu à la surface libre. Nous présenterons les modèles utilisés pour décrire les pertes de chaleur par évaporation et convection à la surface ainsi que pour tenir compte de la perte de masse engendrée. La méthode de vérification mise en place sera détaillée et nous analyserons les propriétés et la descente de la surface libre, la structure globale de l'écoulement, l'évolution des nombres de Rayleigh et de Nusselt ainsi que les statistiques turbulentes.

**Mots clés :** CFD, évaporation, ébullition.



> Mercredi 3 avril

10 h 45 - 11 h 45 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

> **TRANSFERTS - Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement - Session 1**

**Président: Hugo LEPAGE**

Docteur, spécialiste en transfert en milieu aquatique

**Etienne DUREUIL** - Caractérisation du mélange des écoulements à densité variable.

**Hanane BOUNOUAS** - Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti.

**Léonore FLIPO** - Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide / liquide de radionucléides en rivière.

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation du mélange des écoulements à densité variable

|                             |                                                                                  |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Etienne DUREUIL                                                                  |
| Date du début de la thèse : | 01/11/2022                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / STAAR / LRTA                                                           |
| Référent IRSN de la thèse : | Patrick BOYER                                                                    |
| Direction de la thèse :     | Emmanuel MIGNOT / École centrale de Lyon (ECL)                                   |
| École doctorale :           | Lyon COMUE - MEGA de Lyon (Mécanique, Énergie, Génie Civil, Acoustique) - ED 162 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & INRAE                                                                     |

Ce sujet est mené en collaboration entre l'IRSN, l'INRAE et le LFMA. Il traite de la caractérisation des conditions de mélange des écoulements à surface libre et à densité variable en raison d'écart de température ou de turbidité à l'aval des confluences de rivières et des canaux des rejets des CNPE. Dans ces zones, ces écarts peuvent affecter sur plusieurs kilomètres le mélange des polluants, leur fractionnement solide-liquide ainsi que leurs échanges entre la colonne d'eau et les sédiments de fond. La littérature présente bon nombre de descriptions des écoulements à densité variable aux confluences, tant par des expériences en laboratoire, que par des mesures hydrodynamiques (champ de vitesse, turbulence...). Les travaux traitant des processus et de l'efficacité du mélange des eaux sont plus restreints, car ils nécessitent de caractériser le poids sur le mélange de la diffusion turbulente, de la dispersion et des effets de densité qui peuvent limiter les échanges par stratification.

Dans un cadre opérationnel, il est donc important de comprendre ces mécanismes pour quantifier l'impact des polluants sur l'écologie et les usages de l'eau des rivières. Les objectifs scientifiques sont :

- 1 - Caractériser les conditions hydrodynamiques et de mélange en fonction des effets de densité, de hauteur d'eau et de vitesse.
- 2 - Définir un paramètre numérique fiable pour établir à une échelle macroscopique le poids relatif des processus de mélange aux confluences.
- 3 - Prédire, à partir de ce paramètre, des seuils d'utilisation du coefficient de mélange latéral avec une formule de type Fisher, ou un calcul à partir du champ de vitesses 3D en y intégrant les effets de densité.

Le projet comporte :

- des expériences sur un canal hydraulique en contrôlant par la température la différence de densité entre deux affluents. Les gradients de température en surface sont visualisés par caméra thermique et le mélange est caractérisé en fonction de l'écart de conductivité obtenu entre les deux affluents par un faible ajout de sel d'effet négligeable sur la densité et du champ 3D de conductivité mesuré à l'aval.
- des campagnes de terrain à l'aide d'une guirlande de sondes CTD et d'un ADCP embarqués sur un bateau positionné par DGPS permettent de mesurer in-situ les champs 3D de vitesse, de température et de conductivité. 9 cas de terrain ont déjà été étudiés aux confluences Rhône-Saône, Rhône-Arve et à l'aval des rejets thermiques des CNPE du Bugey et de Saint Alban.

**Mots clés :** confluences, mélange, diffusion, dispersion.

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti

|                             |                                                                        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Hanane BOUNOUAS                                                        |
| Date du début de la thèse : | 29/11/2021                                                             |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/STAAR/LERTA                                                    |
| Référent IRSN de la thèse : | Pierre ROUPSARD                                                        |
| Direction de la thèse :     | Yelva ROUSTAN/École des Ponts                                          |
| École doctorale :           | COMUE Paris Est - Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE) - ED 531 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & EDF                                                             |

Les études d'impact des émissions atmosphériques de radionucléides prennent en compte l'ensemble des conditions météorologiques représentatives des sites. Pour les épisodes de vent faible, les processus physiques qui pilotent la dispersion sont modifiés, le transport et la diffusion deviennent faibles et le méandrement peut devenir dominant, ce qui favorise la stagnation des radionucléides émis dans l'atmosphère. Ces conditions de dispersion, difficiles à modéliser ou prises en compte approximativement, peuvent être rencontrées dans le cas d'un rejet accidentel ou chronique de radionucléides par une installation nucléaire, vers un milieu urbain. Ainsi, les résultats de la thèse serviront à l'amélioration de la caractérisation des transferts des radionucléides dans l'environnement et vers l'Homme.

Dans la première partie, une analyse statistique a été menée en utilisant une base de données météorologique enregistrée sur une période de 3 ans au SIRTA (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique, Palaiseau). Cette étude statistique a permis de qualifier le méandrement pour le paramétrer à des fins de modélisation en établissant des relations empiriques entre les paramètres de méandrement et d'autres caractéristiques de la dynamique de l'écoulement. Les périodes du méandrement identifiées présentent un maximum d'occurrence autour de 30 minutes. De plus, le rapport des écarts types de la vitesse horizontale et de la vitesse verticale diminue avec l'augmentation de l'énergie cinétique turbulente. Ce résultat s'explique par les oscillations de la direction du vent dans le plan horizontal dues à l'influence du méandrement. Parallèlement, quatre campagnes de mesures de dispersion atmosphérique (22 essais au total) ont été réalisées au SIRTA sur cette période de 3 ans en dispersant un gaz traceur (l'Hélium).

La deuxième partie porte sur la modélisation CFD des campagnes expérimentales avec code\_saturne pour étudier l'impact du méandrement sur la dispersion d'un panache. Trois approches de type RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) ou URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*) sont étudiées :

- Une simulation en régime stationnaire intégrant des conditions aux limites constantes, en tenant compte du travail de paramétrage sur le méandrement effectué dans l'étude statistique ;
- Une simulation quasi-stationnaire impliquant une combinaison de cas stationnaires, réalisée avec différentes conditions d'entrée représentatives de la variation temporelle des conditions météorologiques pendant le rejet ;
- Une simulation en régime instationnaire avec des conditions aux limites variables.

Dans le but de valider les différentes approches, des comparaisons entre les résultats de modélisation obtenus et les mesures seront réalisées, tant pour les variables dynamiques que pour la concentration du traceur.

**Mots clés :** dispersion, vent faible, milieu bâti.

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide / liquide de radionucléides en rivière

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Léonore FLIPO                                                   |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                  |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / STAAR / LRTA                                          |
| Référent IRSN de la thèse : | Olivier RADAKOVITCH                                             |
| Direction de la thèse :     | Olivier RADAKOVITCH / IRSN                                      |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & EDF                                                      |

Le transfert et le devenir des radionucléides rejetés dans les fleuves par les installations nucléaires sont conditionnés par leur répartition entre les phases dissoute et particulaire. Ce fractionnement solide/liquide est couramment défini par un coefficient empirique appelé  $K_d$  et son utilisation dans les modèles numériques suppose une répartition solide/liquide à l'équilibre, instantanée et réversible. Cependant, ces hypothèses sont la plupart du temps non vérifiées, et si l'adsorption des radionucléides sur les particules est plus lente, la fraction dissoute peut être sous-estimée par le modèle. Ainsi, l'objectif de la thèse est d'évaluer si des modèles de transfert intégrant une ou plusieurs cinétiques pour décrire ce fractionnement permettent des estimations plus fines et plus réalistes qu'une approche à l'équilibre.

Pour ce faire, des cinétiques d'adsorption et de désorption de radionucléides sur des matières en suspension naturelles de rivières ont été suivies en laboratoire pour cinq échantillons différents prélevés le long du bassin versant le plus nucléarisé de France (Rhône). Les radionucléides d'intérêt sont le  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  et  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  car ils sont présents dans différents types de rejets dissous en rivière.

Le transfert de ces radionucléides entre phases solide et liquide a été suivi pendant 2 mois et il a été observé une cinétique d'adsorption qui se stabilise seulement après plusieurs jours ou semaines selon l'élément. Des dilutions de la suspension contaminée dans de l'eau propre ont été réalisées après 1, 3, 10, 21 ou 31 jours d'adsorption préalable pour simuler un changement de conditions environnementales telle une arrivée d'eau non contaminée depuis un affluent. Après la dilution, l'adsorption est de nouveau dominante pour les quatre radionucléides, indiquant que l'équilibre n'était pas atteint, et ce même après 31 jours. Ces données ont été ensuite utilisées pour ajuster les paramètres d'un modèle  $K_d$  et de modèles impliquant une ou plusieurs cinétiques de fractionnement. Contrairement au  $K_d$  qui est une constante, les modèles cinétiques ont été capables de prédire une modification du ratio d'activités solide/liquide avec le temps et lors d'un changement de conditions environnementales. Les différentes approches de modélisation ont été intégrées dans des modèles de transfert globaux développés par l'IRSN et EDF. Les paramètres ajustés grâce aux données expérimentales ont permis de débiter la réalisation de scénarios tests à l'échelle de la rivière en utilisant ces différentes approches. Ils permettront de comparer les résultats obtenus selon différents régimes hydrologiques ou conditions de rejets (normales ou accidentelles).

**Mots clés :** radionucléides, cinétique, fractionnement, rivière, modélisation.

> Mercredi 3 avril

14 h 30 - 15 h 40 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> **FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Physico-chimie des aérosols et des produits de fission**

**Président: Marc BARRACHIN**

Docteur en physique des solides

**Karim ABBAS** - Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés.

**Fouzia DJERIOUAT** - Étude de la rétention par barbotage de produits de fission avec prise en compte de l'impact d'un milieu salin.

**Mtoilibou Abdallah KEYMOON** - Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en conditions APRP ET AG.

**Mohamed Dahi M'HAYHAM** - Modélisation des spectres alpha d'aérosols radioactifs et métrologie des données d'entrée par technologie des micro-capteurs aérosol – Application aux moniteurs de radioprotection utilisés dans des atmosphères atypiques par rapport aux référentiels normatifs IEC.

SUJET DE LA THÈSE

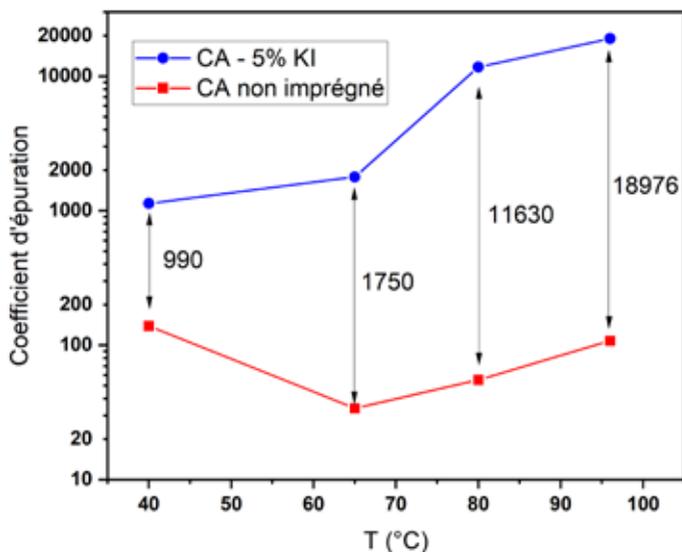
Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés

Doctorant : Karim ABBAS  
 Date du début de la thèse : 09/02/2022  
 Laboratoire IRSN : PSN-RES/SCA/LECEV  
 Référent IRSN de la thèse : Mouheb CHEBBI  
 Direction de la thèse : Bruno AZAMBRE/Université de Lorraine  
 École doctorale : Université de Lorraine - C2MP - Chimie Mécanique Matériaux Physique - ED 606  
 Financement de la thèse : IRSN, EDF & CEA

Cette thèse vise à apporter des éléments de réponse à la question de recherche S1 de la stratégie scientifique de l'IRSN : « Comment mieux caractériser [...] l'efficacité des dispositifs de filtration ou d'épuration dédiés à réduire les rejets en fonctionnement normal et accidentel ».

Les charbons actifs (CA), imprégnés avec de la triéthylènediamine (TEDA) et de l'iodure de potassium (K127I), sont utilisés dans les pièges à iode (PAI) au sein des installations nucléaires afin d'assurer la rétention des gaz iodés (I<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>I) avant rejet. Ces PAI sont testés annuellement avec de l'<sup>131</sup>I. Paradoxalement, les contrôles annuels induisent des émissions importantes en <sup>131</sup>I à l'environnement. Des tests non radioactifs, basés sur la quantification de la réactivité de K127I avec l'<sup>131</sup>I (échange isotopique (EI)), deviennent ainsi essentiels.

Lors d'une thèse précédente (H. Lin, 2022), un effet faible du KI sur les coefficients d'épuration (CE = [CH<sub>3</sub><sup>131</sup>I]<sub>amont</sub>/[CH<sub>3</sub><sup>131</sup>I]<sub>aval</sub>) des CA a été observé à température ambiante, rendant la quantification de cet effet difficile en présence de la TEDA. Dans la première phase de ma thèse, une étude paramétrique (température, vitesse de passage...) a été menée sur les CA non imprégnés et CA imprégnés avec 5% de KI, pour déterminer les configurations expérimentales favorisant la réaction d'EI. Des améliorations sur l'installation PERSEE ont été apportées pour mener cette étude paramétrique et quantifier notamment l'effet de la température. Ce dernier semble être le plus influent, entraînant une promotion de la réaction d'échange isotopique entre l'<sup>131</sup>I et l'<sup>127</sup>I du KI au détriment de la physisorption (figure 1). A partir des résultats obtenus, il apparaît qu'une étape de dissociation thermiquement activée du CH<sub>3</sub>I<sup>131</sup>I semble être nécessaire avant la réaction d'EI. Ensuite, dans une configuration représentative des contrôles des PAI (T=40-65°C, HR <=40%), des essais de comparaison entre KI et TEDA pour les charbons simplement imprégnés et co-imprégnés ont été réalisés, soulignant un rôle prononcé de KI.



En perspectives, la comparaison des courbes de percée de CH<sub>3</sub>I radioactif et stable, permettra une quantification précise de l'apport de l'EI. La dépendance de l'EI en fonction des paramètres du matériau sera également étudiée. Une attention sera accordée aux sels d'ammonium quaternaires issus de la réaction de CH<sub>3</sub>I avec la TEDA (études spectroscopiques in-situ), susceptibles de contribuer au mécanisme d'EI.

**Mots clés :** adsorption, iode radioactif, sûreté nucléaire, charbons actifs, échange isotopique.

SUJET DE LA THÈSE

Étude de la rétention par barbotage de produits de fission  
avec prise en compte de l'impact d'un milieu salin

|                             |                                                                                                                |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Fouzia DJERIOUAT                                                                                               |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                                                     |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEREX/L2EC                                                                                             |
| Référent IRSN de la thèse : | Philippe NERISSON & Catherine MARCHETTO                                                                        |
| Direction de la thèse :     | Olivier VAUQUELIN & Maxime CHINAUD / Aix Marseille Université                                                  |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                           |

L'IRSN mène des recherches pour caractériser, en conditions accidentelles survenant sur un réacteur nucléaire, les mécanismes de piégeage des produits de fission lorsque ceux-ci sont relâchés au sein d'un milieu aqueux. Ces mécanismes de mitigation par « *pool scrubbing* » ou par "barbotage" peuvent intervenir naturellement à la fois dans les Réacteurs à Eau sous Pression (en particulier en cas d'accident de Rupture de Tube de Générateur de Vapeur) mais aussi dans les sous-marins à propulsion nucléaire. Ils peuvent être également volontairement mis à profit comme moyen limitant les rejets radioactifs à travers des systèmes dédiés de filtration, tels que les systèmes FCVS (*Filtered Containment Venting System*).

Une première thèse menée à l'IRSN a permis de caractériser la taille des bulles se formant à l'injection (Farhat *et al.*, 2021) et la rétention des aérosols de CsI (Farhat *et al.*, 2023) et des espèces volatils (CH<sub>3</sub>I, I<sub>2</sub>) dans de l'eau claire, en contextes RTGV et FCVS. Le présent travail vise à évaluer l'influence d'un milieu salin sur ces résultats, ainsi qu'à étendre les configurations testées en eau claire. Pour cela, la taille des bulles à l'injection et le facteur de décontamination des espèces iodées mentionnées seront déterminés dans une solution saline de type eau de mer, dans le dispositif TYFON (Trapping and hYdrodynamic for Fission product), puis comparés aux résultats en eau claire. En parallèle, une étude théorique du panache de bulles se formant en aval de l'injection sera réalisée, en s'appuyant sur des expériences réalisées à l'IUSTI Marseille. L'objectif à terme est d'améliorer la modélisation du pool scrubbing du code ASTEC, développé par l'IRSN.

L'étude bibliographique menée en première année de thèse montre l'influence des sels sur l'hydrodynamique de l'écoulement gazeux dans le bain d'eau. Notamment, il est communément observé, en présence de sels, une diminution de la vitesse des bulles liée aux phénomènes de transport à leurs surfaces et une diminution de la taille des bulles due à la désinhibition de la coalescence.

Une étude de qualification est en cours sur TYFON, pour optimiser les conditions des futurs essais en milieu salin. Pour cela, une comparaison entre les résultats (hydrodynamique et rétention) obtenus avec de l'eau de mer prototypique et de l'eau contenant uniquement du NaCl est effectuée. En 2024, une fois la solution saline retenue, la grille d'essais répondant aux objectifs précités sera menée sur TYFON, en parallèle de l'étude expérimentale et théorique du panache.

**Mots clés :** mitigation des rejets, pool scrubbing, milieu salin, panache de bulles, coalescence, phénomène de transport, modélisation hydrodynamique.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en conditions APRP ET AG

|                             |                                                                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Mtoilibou Abdallah KEYMOON                                                                                                   |
| Date du début de la thèse : | 02/03/2023                                                                                                                   |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEREX/L2EC                                                                                                           |
| Référent IRSN de la thèse : | William LE SAUX                                                                                                              |
| Direction de la thèse :     | Marie-Odile SIMONNOT/Université de Lorraine & Laurent CANTREL/IRSN                                                           |
| École doctorale :           | Université de Lorraine - SIMPPE - Sciences et ingénierie des molécules, des produits, des procédés, et de l'énergie - ED 608 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                                         |

Lors d'un accident de type APRP impliquant une brèche sur le circuit primaire d'un réacteur nucléaire, des débris sont générés par le jet de vapeur d'eau et peuvent être transportés jusqu'aux filtres RIS/EAS des puisards situés au fond de l'enceinte de confinement. Ces débris peuvent contribuer au colmatage physique et potentiellement chimique de ces filtres. La contribution chimique correspond à la formation des précipités/gels au sein du lit fibreux augmentant le facteur colmatant. La formation de ces précipités résulte de la présence en solution d'ions suite à la dissolution partielle des débris (isolants, peinture et béton) et à la corrosion des surfaces métalliques. Ce phénomène peut entraîner une défaillance du système de recirculation pouvant conduire à un Accident Grave (AG) par défaut de refroidissement du cœur du réacteur.

L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier la nature des effets chimiques, les paramètres les conditionnant et leur impact sur la perte de charge des filtres de puisards en cas d'APRP et AG.

Une méthodologie expérimentale a été développée en considérant deux échelles. Dans un premier temps, l'étude s'est focalisée sur des essais à petite échelle (~ 1L). Des essais de dissolution des débris générés dans les puisards ont été réalisés (conditions EPR et REP 1300 MWe). Ces essais ont permis d'estimer la quantité des espèces considérée (calcium, silicium et zinc) relâchée à l'échelle du réacteur à 80°C sur 72h (matrice H3BO3/NaOH à pH ~7). D'après les premiers résultats, il apparaît que la quantité de silicium émise par les débris (principalement les fibres minérales) est plus importante que la quantité de calcium et de zinc. Ces résultats vont permettre de réaliser des essais avec des solutions modèles afin d'étudier les effets chimiques en situation d'APRP. Des éléments tels que le fer et le césium (en cas d'AG) viendront compléter cette étude. Les résultats de ces essais seront couplés à une approche thermodynamique grâce à des outils de calcul de type géochimique (CHESS/PHREEQC).



Ces essais seront complétés par des essais à moyenne échelle dans le dispositif COPIN (COlmatage des Puisards dans l'Industrie Nucléaire) appartenant à l'IRSN dans lequel des débris seront injectés.

**Mots clés :** APRP, colmatage des puisards, effets chimiques, précipités, perte de charge.

SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation des spectres alpha d'aérosols radioactifs et métrologie des données d'entrée par technologie des micro-capteurs aérosol – Application aux moniteurs de radioprotection utilisés dans des atmosphères atypiques par rapport aux référentiels normatifs IEC**

|                             |                                                                                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Docteurant :                | Mohamed Dahi M'HAYHAM                                                                                                                    |
| Date du début de la thèse : | 03/01/2023                                                                                                                               |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SCA/LPMA                                                                                                                         |
| Référent IRSN de la thèse : | Grégoire DOUGNIAUX                                                                                                                       |
| Direction de la thèse :     | Xavier MOUGEOT / CEA Gif sur Yvette                                                                                                      |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau :<br>Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                                                     |

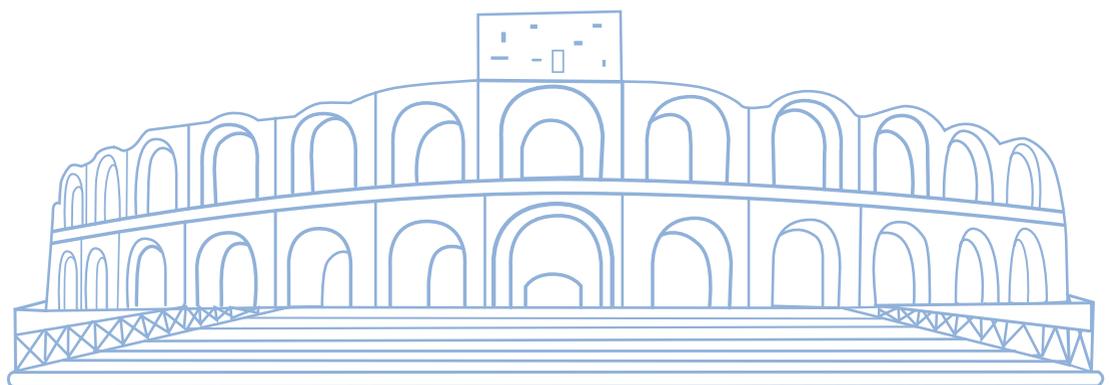
Dans les installations nucléaires, la réglementation impose une surveillance en continu afin d'alerter les opérateurs en cas de contamination atmosphérique liée à une émission incidentelle de substances radioactives. Cette surveillance est assurée par une grande variété de dispositifs, dont les moniteurs de mesure de la contamination atmosphérique CAM (*Continuous Air Monitor*). Ces moniteurs prélèvent les aérosols ambiants sur un filtre et mesurent en continu l'activité déposée. Cette mesure en temps réel est influencée par un bruit de fond dû au radon et à ses descendants omniprésents. Utilisés dans des conditions atypiques, notamment en termes d'empoussièrement, ces dispositifs peuvent présenter un comportement inattendu se traduisant par l'émission de fausses alarmes. En effet, une corrélation entre la dégradation des spectres alpha et les caractéristiques des aérosols collectés sur le filtre (granulométrie, concentration et masse totale) a été mise en avant par l'IRSN.

Un modèle de simulation numérique de l'influence des aérosols sur la mesure nucléaire, validé par l'expérience, permettrait de corriger les erreurs de mesure des moniteurs CAM en générant des données fiables. La modélisation des spectres alpha d'aérosols collectés dans ces moniteurs pose néanmoins plusieurs difficultés, essentiellement liées à la nécessité de réaliser une simulation aussi réaliste que possible des structures de dépôt d'aérosols et du transport des particules alpha à travers ce dépôt. La démarche envisagée consiste dans un premier temps à simuler la géométrie des particules déposées sur le filtre, puis dans un second temps à simuler le transport des particules alpha dans ce dépôt.

Avant de déterminer l'impact de l'accumulation des aérosols sur la mesure de la radioactivité alpha, il semble nécessaire de bien caractériser les différentes sources d'influence sur cette mesure, à savoir la réponse du détecteur et l'épaisseur d'air. Ainsi, une étude a été réalisée dans le but d'évaluer l'impact de chaque paramètre d'influence de manière indépendante. Il s'agit, pour la première fois, de la réalisation de comparaisons entre les spectres simulés et un spectre expérimental de radon idéal, lequel a été mesuré par le CEA à l'aide de la méthode de l'angle solide défini.

La réponse des détecteurs silicium pour le rayonnement alpha n'ayant pas été assez étudiée dans la littérature, des travaux complémentaires impliquant d'autres types de détecteurs sont donc nécessaires pour la validation du modèle. Ainsi, avec une bonne prise en compte des sources d'influence, tous les écarts entre simulation et expérience seront directement imputables aux aérosols.

**Mots clés :** métrologie des aérosols, aérosols radioactifs, moniteur de contamination atmosphérique, spectre alpha, simulation GEANT4.



> Mercredi 3 avril

14 h 30 - 15 h 35 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

> ACCIDENT RADIOLOGIQUE- Aide à la prise en charge de victimes

**Présidente : Carmen VILLAGRASA**

Docteure en physique nucléaire

**Quentin TALLON** - Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques. Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH.

**Lucie ANCEL** - Nouveaux marqueurs moléculaires de la brûlure radiologique par approche "multi-omique".

**Mahinour MOBASHER** - Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens.

## SUJET DE LA THÈSE

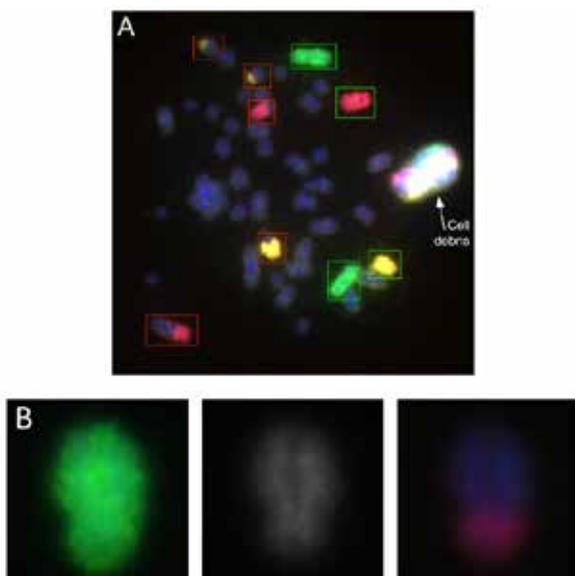
Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques.  
Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH

|                             |                                                                                                                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Quentin TALLON                                                                                                                    |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                                                                                    |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN / SERAMED / LRAcc                                                                                                         |
| Référent IRSN de la thèse : | Mohamed Amine BENADJAOUD                                                                                                          |
| Direction de la thèse :     | Charles KERVRANN / INRIA Rennes - Bretagne Atlantique                                                                             |
| École doctorale :           | Université Bretagne Loire – Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (MATHSTIC) - ED 601 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & Agence Innovation Défense (AID)                                                                                            |

Suite à une exposition accidentelle à des rayonnements ionisants, il est nécessaire d'affiner l'évaluation de la dose reçue pour effectuer un tri efficace des victimes asymptomatiques. Parmi les techniques disponibles, la dosimétrie biologique s'appuie sur dénombrement des aberrations chromosomiques dans les lymphocytes circulants. Donnée indispensable dans l'estimation du risque radiologique, la dosimétrie est l'objet de la plupart des grandes questions scientifiques de la radioprotection de l'IRSN. Cette thèse contribue à l'évolution des outils pour une meilleure prise en charge des victimes en cas d'accident radiologique ou d'acte de malveillance. Ce projet de thèse s'intéresse particulièrement aux aberrations stables, car elles persistent au cours des divisions cellulaires et peuvent servir de base à une dosimétrie rétrospective. La technique d'imagerie cytogénétique de référence est l'hybridation *in situ* par fluorescence (FISH). L'objectif est de développer et de valider un modèle d'intelligence artificielle capable de détecter automatiquement ces aberrations. Les difficultés proviennent du nombre restreint d'annotations des données, ce qui constitue un défi pour l'apprentissage profond. L'idée est alors de développer des techniques capables à la fois de tirer parti d'annotations spatiales, mais aussi de la majorité de données non annotées. Le Faster-RCNN, réseau de neurones de détection d'objets, est pertinent ici car il permet de simultanément localiser et de classifier les chromosomes. Nous obtenons de très bons résultats sur la détection de chromosomes fluorescents, mais la distinction d'aberrations reste perfectible. Pour essayer de l'améliorer, nous avons étudié la classification au niveau des chromosomes via des réseaux ResNet, après segmentation par des réseaux U-Net. Ensuite, afin d'obtenir un gain de performance, nous avons exploré l'impact du prétraitement de nos images. Des techniques

de matching d'histogramme, combinées à des critères d'espacement d'objets, ont permis une augmentation significative des scores de performance. Enfin, pour palier à la restriction du nombre de données annotées, nous explorons la possibilité de créer des données synthétiques grâce à des modèles génératifs. Ce travail est effectué à l'échelle du chromosome, et peut se faire à partir de canaux DAPI des données non annotées.

**Mots clés :** intelligence artificielle, deep learning, computer vision, détection, dosimétrie, chromosomes, FISH.



(A) Détection des translocations d'une image FISH, les boîtes indiquent la localisation des éléments d'intérêt (chromosomes fluorescents) : en vert les non-aberrants, en rouge les aberrants.

(B) Exemple de chromosome synthétique généré à partir d'un canal DAPI réel : à gauche l'image réelle initiale, au centre son canal DAPI, à droite la translocation synthétique générée à partir du DAPI.

## SUJET DE LA THÈSE

Nouveaux marqueurs moléculaires de la brûlure radiologique  
par approche "multi-omique"

|                             |                                                                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Lucie ANCEL                                                                               |
| Date du début de la thèse : | 04/10/2021                                                                                |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SERAMED/LRAcc                                                                     |
| Référent IRSN de la thèse : | Stéphane FLAMANT                                                                          |
| Direction de la thèse :     | Maamar SOUIDI/IRSN & Stéphane FLAMANT/IRSN                                                |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay – Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                      |

Partie 1 - Le sujet de thèse s'inscrit dans le nouveau GTR/AP 003/14 « Réponse médicale et sanitaire renforcée aux situations d'urgence radiologique et nucléaire », et s'adresse à la question 3 de la stratégie scientifique de l'institut concernant l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions aux rayonnements ionisants, notamment dans le contexte d'accidents majeurs. L'objectif de cette thèse vise à identifier, par une approche multiparamétrique et large spectre de type omique appliquée à un modèle expérimental préclinique murin, de nouveaux marqueurs biologiques peu ou non invasifs (biofluides), à visée diagnostique et pronostique de la survenue et de la sévérité d'une brûlure radiologique.

Partie 2 - La première partie de la thèse a pour objectif d'apporter la preuve de concept de l'utilisation des biomarqueurs sélectionnés (microARNs et métabolites) et d'identifier des signatures moléculaires diagnostiques plasmatiques et urinaires associées à une lésion radio-induite (LRI) établie chez la souris. La seconde partie concerne l'identification de signatures moléculaires pronostiques de la LRI et de sa sévérité à l'aide de modèles précliniques asymptomatiques. Enfin, la dernière partie se consacre à la caractérisation de la lésion à l'échelle tissulaire.

Partie 3 - Un criblage large spectre suivi d'une étude ciblée des microARNs et métabolites sanguins et urinaires après irradiation ont conduit à l'identification de panels de biomarqueurs de diagnostic dont les variations d'expression permettent de distinguer les animaux selon la sévérité des lésions. Plus précisément, des analyses statistiques multivariées ont permis la validation d'une signature de microARNs plasmatiques associée à la sévérité de la LRI (Ancel *et al.*, en révision Scientific Reports). De manière similaire, nous avons identifié des signatures de métabolites plasmatiques et urinaires associées à la sévérité des LRI (Ancel *et al.*, en préparation). Ainsi, cette première étude diagnostique démontre la pertinence de l'utilisation des microARNs et métabolites dans les fluides biologiques comme biomarqueurs moléculaires de la LRI. Dans une seconde étude préclinique, des panels de microARNs et métabolites plasmatiques ont été identifiés comme signatures moléculaires pronostiques de la lésion à différents temps précoces après irradiation et avant l'apparition des premiers signes cliniques. En parallèle, l'analyse des tissus à différents temps après irradiation a contribué à mieux caractériser le développement des effets physiopathologiques. De manière intéressante, une liste de microARNs différentiellement exprimés dans la peau et le muscle en fonction de la sévérité lésionnelle a été identifiée, dont certains microARNs ayant été décrits comme biomarqueurs circulants dans nos précédentes études.

**Mots clés :** brûlure radiologique, biomarqueurs, microARN, métabolites.

## SUJET DE LA THÈSE

## Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens

|                             |                                                          |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Mahinour MOBASHER                                        |
| Date du début de la thèse : | 10/11/2021                                               |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SDOS/LDRI                                        |
| Référent IRSN de la thèse : | François TROMPIER                                        |
| Direction de la thèse :     | Nadège OLLIER/École polytechnique                        |
| École doctorale :           | Institut Polytechnique de Paris - (ED IP Paris) - ED 626 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                     |

In case of large-scale radiological accidents with external exposure, there is no current dosimetric quantification method to sort the exposed individuals. This thesis aims to participate in the development of a method of retrospective dosimetry with large throughput as part of IRSN's strength line n°8 dedicated to developing methodologies and decision support tools of an operational nature. The proposed method is the use of smartphone touchscreen or screen protector for dose determination by using Electron paramagnetic Resonance spectroscopy (EPR). The advantage of the smartphones is its availability to everyone providing a fortuitous & quasi-universal dosimeter. Our goal is to build a robust analysis protocol to extract the main features of the EPR signals induced by irradiation among all unwanted signal components. The variability in composition of the tempered glass found in different smartphones is one of the main difficulties. Composition's changes induce different EPR radio-induced signatures affecting the sensitivity to dose. We need to study the variability of the EPR signal components in the various glass types. Thus, signals prior irradiation, induced by UV and ionizing radiation are studied in detail (thermal stability, UV effect on stability, dose sensitivity) to understand the mechanism and nature of radio-induced defects' formation. Glass chemical analysis was performed to facilitate these point defects' identification. Afterwards, we produced our own glass with similar but controlled composition. Varying the concentration of elements possibly involved in the mechanism of formation in those lab-made glasses will help us to understand the different radio-chemical mechanisms and simulating the different associated EPR components regardless of the glass type for next step in the project. One of the leading companies for touchscreen production is Corning® featuring Gorilla® Glass (GG) generations (8 generations, known to be alkali-alumino-silicate glasses) where I am currently investigating its latest generations 5&7. In GG5&7, 4 radio-induced point defects for each have been identified. Thanks to this work, unfolding of the different components of the EPR spectra is now possible to provide accurate dose determination. In GG7, from analysis of EPR spectra, traces of Fe<sup>3+</sup> and Mn<sup>2+</sup> ions have been found. These ions, even at traces level, act as quencher for the formation of the point defects and could explain therefore the lower sensitivity to dose. UVB Irradiation induces intense EPR components, contrarily to previous generations, they can be differentiated from the X-rays-induced ones. Variability studies were performed to evaluate a possible application to large-scale accidents.

**Mots clés :** large scale radiological accident, EPR, point defects, smartphone, glass, Gorilla glass, screen protector.

> Mercredi 3 avril

16 h 00 - 17 h 15 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Vieillessement des matériaux du réacteur

**Présidente: Fabienne RIBEIRO**

Docteure en chimie physique

**Apou Martial KPEMOU** - Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5Framatome après une sollicitation de type APRP.

**Kushal Gowda JAYARAM** - Understanding the mechanisms of low cycle fatigue of Alloy 690 in the PWR environment.

**Loïc CHAIX** - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié.

**Estelle LAGARDÈRE** - Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement.

SUJET DE LA THÈSE

Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5Framatome  
après une sollicitation de type APRPP

|                             |                                                                                  |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Apou Martial KPEMOU                                                              |
| Date du début de la thèse : | 13/09/2021                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEREX/LE2M                                                               |
| Référent IRSN de la thèse : | Séverine GUILBERT                                                                |
| Direction de la thèse :     | Marie-Christine BAIETTO/INSA Lyon                                                |
| École doctorale :           | Lyon COMUE - MEGA de Lyon (Mécanique, Énergie, Génie Civil, Acoustique) - ED 162 |
| Financement de la thèse :   | IRSN, EDF & Framatome                                                            |

L'IRSN, dans le cadre de la sûreté des centrales nucléaires, étudie différents scénarios accidentels hypothétiques. Cette thèse s'intègre dans l'étude des Accidents de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Les APRP résultent de l'apparition d'une brèche sur le circuit primaire d'un réacteur à eau pressurisée (REP) et conditionnent le dimensionnement des dispositifs de secours. Lors d'un transitoire APRP, les crayons combustibles constitués de gaine en alliage de zirconium et de pastilles de combustible sont soumis à des sollicitations thermomécaniques et chimiques. En cas d'éclatement de la gaine, un phénomène de prise massive d'hydrogène peut survenir en interne du crayon combustible. Ce phénomène complexe connu sous le nom d'hydruration secondaire résulte de l'oxydation à haute température (au-delà d' $\sim 900^{\circ}\text{C}$ ) de la surface interne de la gaine par de la vapeur d'eau. Des essais dits semi-intégraux ont été développés au niveau international afin d'étudier le comportement des crayons combustibles en conditions d'APRP. La nature de ces essais, ainsi que la difficulté de maîtrise des différents paramètres influents complexifient l'analyse fine du phénomène d'hydruration secondaire.

Dans ces travaux de thèse, des essais analytiques ont été mis en place pour une meilleure compréhension du phénomène. Au travers de ces essais, l'influence de divers paramètres sur l'hydruration secondaire a été investiguée. Les résultats obtenus indiquent par exemple que la quantité totale d'hydrogène absorbée par la gaine est liée au degré d'oxydation de cette dernière et également de l'espace entre la pastille de combustible et la gaine. Le positionnement des pastilles dans la gaine a également une influence sur la distribution azimutale de l'hydrogène absorbée par la gaine. Des méthodes de caractérisations microscopiques et de micro-analyses (microsonde de Castaing, micro-LIBS, SIMS) ont permis d'analyser la distribution de l'hydrogène et de l'oxygène qui fragilisent la gaine. Ces analyses ont permis de mettre en évidence un lien entre ces deux éléments. Les résultats obtenus serviront de données de validation pour les codes modélisant l'hydruration secondaire. Dans ce cadre, des développements ont été effectués afin de pouvoir modéliser les essais réalisés par le biais du logiciel SHOWBIZ développé par l'IRSN. Les résultats préliminaires obtenus à ce stade indiquent une cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques, offrant une base pour la validation et l'affinement des modèles physiques utilisés.

**Mots clés :** APRP, hydruration secondaire, oxydation, fragilisation, micro, analyses, M5, Framatome.

## SUJET DE LA THÈSE

**Understanding the mechanisms of low cycle fatigue of Alloy 690  
in the PWR environment**

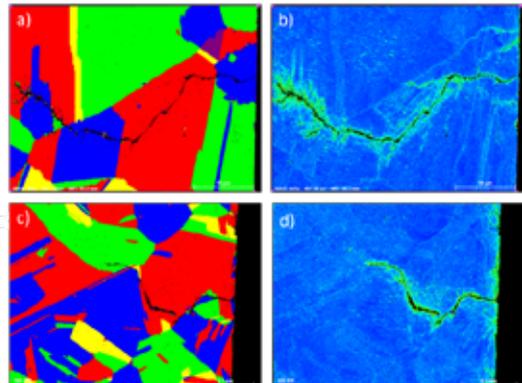
|                             |                                                                                                                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Kushal Gowda JAYARAM                                                                                                    |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                                                                              |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEREX/LE2M                                                                                                      |
| Référent IRSN de la thèse : | Joseph HURET & Walter CHITTY                                                                                            |
| Direction de la thèse :     | Gilbert HENAFF/ENSMA                                                                                                    |
| École doctorale :           | Universités de Poitiers & de Limoges - Sciences et Ingénierie des Matériaux,<br>Mécanique, Énergétique (SIMME) - ED 609 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                                    |

Environmentally Assisted Fatigue (EAF) is one of the concerns for the extended operation of nuclear power plants. Over time, certain components experience thermal cycling while being exposed to the chemically active environment of Pressurized Water Reactors (PWRs). While many components in the primary loop are made of stainless steels, some critical parts are made from Alloy 690, a nickel-based alloy. Compared to the extensive research on EAF in stainless steels, only a limited focus has been placed so far on Alloy 690. So, it is therefore identified as the interest of the institute to evaluate the effects of the environment on the fatigue life of Alloy 690.

This study aims to assess the impact of the PWR primary water environment on the fatigue life of Alloy 690. Low cycle fatigue tests were conducted in two different environments, namely air and PWR environment, at different strain amplitudes and strain rates. To investigate the mechanisms of EAF in Alloy 690, fracture surfaces were analyzed to estimate the fatigue crack growth rate from striation spacing measurements. To understand the effect of the environment on the strain localization near the crack path, the fractured samples were cut axially and were analyzed using Electron Backscatter Diffraction (EBSD). Additionally, microstructural changes were examined using Transmission Electron Microscopy (TEM) on the specimens from interrupted tests at different stages of the fatigue life.

First, the continuous increase in maximum stress observed throughout the cycling process at 300°C signifies the presence of Dynamic Strain Aging (DSA) mechanism. This observation is further confirmed by the appearance of serrations in the hysteresis loops observed in tests conducted at 300°C.

Secondly, the results indicate that, at a  $F_{en}$  (Environmental factor) of 2, there is minimal or almost no influence of the environment on the fatigue life of Alloy 690 in PWR conditions when compared to its behavior in an air environment. This observation is consistent with the crack growth rates, which demonstrate similar characteristics in both environments. However, the below EBSD images show two different modes of crack propagation i.e., intragranular propagation in air and mixed propagation both intragranular and intergranular propagation in PWR environment. Moreover, the Kernel Average Misorientation (KAM) images show almost similar strain localization in both the environment.



**Mots clés :** Alloy 690, LCF, environmentally assisted fatigue.

SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal :  
application au durcissement d'un acier irradié**

|                             |                                                                                                                       |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Loïc CHAIX                                                                                                            |
| Date du début de la thèse : | 02/11/2021                                                                                                            |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEMIA/LSMA                                                                                                    |
| Référent IRSN de la thèse : | Pierre-Guy VINCENT                                                                                                    |
| Direction de la thèse :     | Mihail GARAJEU / Aix Marseille Université<br>& Martin IDIART / Université Nationale de La Plata (UNLP - Buenos Aires) |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique,<br>micro et nanoélectronique - ED 353     |
| Financement de la thèse :   | IRSN & ISFIN                                                                                                          |

Cette thèse vise à améliorer la modélisation du comportement mécanique des aciers de cuve irradiés en réacteur, en considérant l'effet des défauts cristallins induits par l'irradiation neutronique. Cela impacte le durcissement et la fragilisation de l'acier, notamment sa température de transition. Ce travail contribue à évaluer l'impact sur la sûreté des installations nucléaires, en accord avec la stratégie scientifique de l'IRSN.

Pour cela, le programme de travail comporte trois axes principaux :

- l'intégration d'une nouvelle loi de plasticité cristalline à base physique [Monnet, 2022] spécifique pour les aciers de cuve dans le code de calcul FFT CraFT [Moulinec et Suquet, 1994],
- la réalisation d'une campagne de simulations FFT en champs complets sur polycristaux, en considérant différents types de résultats expérimentaux, pour calibrer et valider la loi,
- l'implémentation de différentes méthodes d'homogénéisation et réalisation de calculs en champs moyens sur polycristaux pour être confrontés à des simulations FFT.

Une fois l'implémentation de la loi cristalline dans le code CraFT réalisée et la calibration de la loi faite au travers de six paramètres, les simulations FFT ont révélées un bon accord général avec les différents résultats expérimentaux considérés, pour une plage de températures, de vitesses de chargement et de doses d'irradiation.

Par la suite, des résultats déterminés par homogénéisation via des approximations en champs moyens et par des simulations FFT sont confrontés. Les approximations en champs moyens sont obtenues en utilisant des méthodes d'homogénéisation non-linéaires «à un potentiel», qui homogénéisent séparément les déformations élastiques et plastiques, et en employant divers schémas de complexité croissante tels que les schémas élémentaires de Taylor et Sachs ou les schémas auto-cohérents plus récents basés sur le concept de milieu linéaire de comparaison comme FOSO [Ponte Castañeda, 2015]. Plusieurs façons de prendre en compte le durcissement local dans les approximations en champs moyens sont présentées et discutées. Les résultats sont fournis pour des polycristaux non texturés soumis à un essai de traction uniaxiale. Dans l'ensemble, le schéma FOSO s'avère offrir le meilleur compromis entre précision et complexité mathématique pour générer des descriptions homogénéisées.

Actuellement, une piste théorique est explorée avec la méthode FOSO. En s'inspirant des travaux de [Lahellec et Suquet, 2007] sur les principes variationnels incrémentaux, elle vise à traiter l'homogénéisation de façon couplée, en considérant la partie élastique déviatorique et plastique du tenseur des déformations, l'idée étant d'améliorer la transition élastoplastique et de pouvoir étudier les statistiques de champs, chose non faisable avec l'approche découplée.

**Mots clés :** aciers de cuve irradiés, plasticité cristalline, polycristal, méthode à base de transformées de Fourier rapides, micromécanique.

## SUJET DE LA THÈSE

## Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement

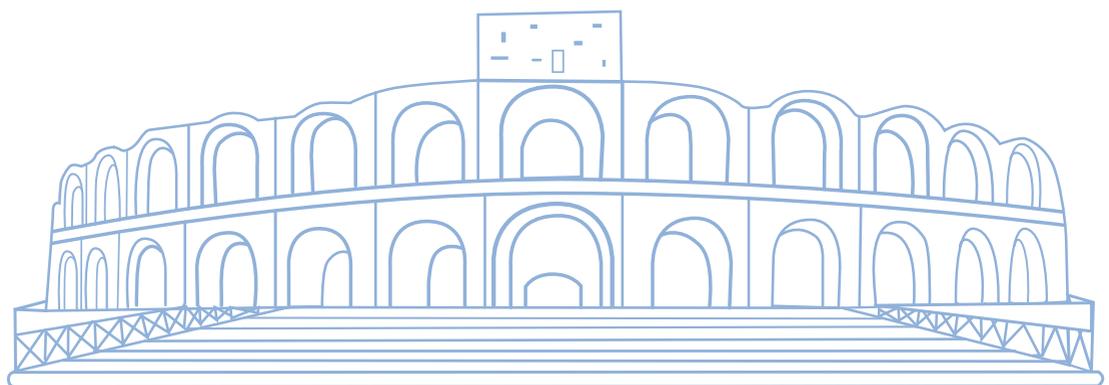
|                             |                                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Estelle LAGARDÈRE                                       |
| Date du début de la thèse : | 02/11/2022                                              |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-EXP/SES/BECM                                        |
| Référent IRSN de la thèse : | Ian DE CURIERES                                         |
| Direction de la thèse :     | Lydia LAFFONT/Université de Toulouse                    |
| École doctorale :           | Université Toulouse 3 – Sciences de la matière - ED 482 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & CNL                                              |

Dans les centrales nucléaires, les tubes de générateur de vapeur (GV) permettent le transfert de chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire. La dégradation de ces tubes constitue un risque de perte de confinement et de relâchement de produits radioactifs dans l'atmosphère. Afin de maîtriser ce risque, il est nécessaire d'identifier l'effet des produits de corrosion et des polluants sur la dégradation des tubes de GV. Les recherches menées lors de cette thèse ont pour objectif d'analyser l'effet du plomb et du soufre, polluants parfois présents dans le milieu secondaire, sur la sensibilité à la corrosion et corrosion sous contrainte (CSC) en paroi externe des tubes de GV.

Afin d'étudier ces phénomènes, des éprouvettes U-Bend ont été testées dans des conditions d'essais similaires aux conditions de fonctionnement des GV. Ces éprouvettes sont constituées d'Inconel 690 TT, l'alliage base nickel que l'on retrouve majoritairement dans les tubes de GV actuels. Deux facteurs environnementaux sont alors étudiés : l'état physique de l'environnement à proximité des tubes (trois possibilités : dépôts solides, milieu secondaire en phase liquide ou milieu secondaire en phase vapeur humide) et la présence de polluants à base de plomb et/ou de soufre dans les dépôts solides. Le rôle de ces paramètres dans les phénomènes d'endommagement des tubes de GV est étudié à l'aide de différentes techniques de caractérisation, allant de la microscopie optique à la microscopie électronique à balayage (MEB), en passant par la microscopie électronique en transmission (MET) associée à la spectroscopie de dispersion en énergie des rayons X (EDS). La première partie de ces analyses concerne le rôle du soufre sur la corrosion et la CSC de l'alliage 690 TT. Une étude complémentaire de l'impact du soufre combiné avec le plomb est envisagée pour la suite des recherches.

Les faibles concentrations en soufre présentes dans le milieu secondaire (inférieures à 10 000 ppm) nécessitent des techniques de mesures très précises et un post traitement rigoureux lors de l'interprétation des résultats d'analyses. Ces caractérisations permettent de constater que si la présence de soufre dans le milieu ne semble pas influencer la nature et l'épaisseur des oxydes formés en surface des échantillons, elle semble toutefois favoriser l'oxydation et la fragilisation du métal à l'interface avec l'oxyde. De faibles traces de soufre sont aussi détectées localement dans les oxydes de surface mais aussi dans les oxydes formés en pointe de fissure.

**Mots clés :** alliage base nickel, tubes de GV, corrosion, corrosion sous contrainte, plomb, soufre.



## > Mercredi 3 avril

16 h 00 - 16 h 50 Salle Marie Mauron

### SESSION PARALLÈLE

#### > TRANSFERTS - Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement - Session 2

**Président: Frédéric COPPIN**

Docteur, spécialiste en transfert en milieu aquatique

**François GUILLORY** - Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants : *continuum* sol-rivière.

**Séléna FERRERES** - Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire.

**Meryem MEZIANE** - Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés grâce à la géostatistique non-stationnaire.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants :  
*continuum sol-rivière*

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | François GUILLORY                                               |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                      |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / STAAR / LRTA                                          |
| Référent IRSN de la thèse : | Hugo LEPAGE                                                     |
| Direction de la thèse :     | Hugo LEPAGE / IRSN & Sabine SAUVAGE / CNRS                      |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                            |

L'une des missions de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire est d'évaluer les risques liés aux rayonnements ionisants et aux substances radioactives. L'IRSN utilise ainsi plusieurs outils pour modéliser les transferts dans les différents compartiments (atmosphère, sol fleuve, mer, biodiversité) et évaluer l'exposition de l'homme, de la faune et de la flore. Si l'outil actuel pour modéliser les transferts au sein des bassins versants est particulièrement adapté à la situation de crise, il n'est pas spatialisé et ne prend pas en compte des éléments essentiels au transfert de la radioactivité tels que l'occupation des sols ou encore le relief. Les travaux portés par cette thèse visent donc à développer un outil plus spatialisé pour évaluer la dispersion du césium-137 des bassins versants, un des radionucléides les plus problématiques en contexte post-accidentel.

Pour y parvenir, la modélisation sera développée à partir d'un outil existant, Soil & Water Assessment Tool (SWAT), fortement utilisé et éprouvé dans de nombreux bassins versants pour simuler l'hydrologie et le transfert de certaines substances telles que les pesticides et nutriments. Un module spécifique au  $^{137}\text{Cs}$  sera développé afin de prendre en compte son comportement dans les bassins versants (transfert sol/plante, fractionnement liquide/solide...), en s'appuyant sur le module déjà existant de transfert du potassium, analogue du césium. Le modèle sera appliqué (1) au bassin versant du Rhône, affecté par les retombées de l'accident de Tchernobyl et instrumenté depuis de nombreuses années par l'IRSN, et (2) à la région de Fukushima en s'appuyant sur les nombreuses données disponibles et sur des travaux préliminaires.

Les travaux de première année ont permis de prendre en main l'outil et de réaliser la calibration et la modélisation des paramètres hydrologiques principaux (débit et charge en suspension) dans un sous-bassin versant du Rhône, l'Ardèche, qui est instrumentée depuis 2016. La calibration complète de l'hydrologie et des sédiments sur l'Ardèche aura nécessité 208 simulations couplées à des analyses bibliographiques et avis d'experts. Nous avons atteint les scores de modélisation de l'hydrologie de  $r^2=0.87$  ;  $KGE=0.91$  ;  $NSE=0.87$ ). La prédiction des matières en suspension est moins bonne car plus complexe à modéliser.

**Mots clés :** modélisation opérationnelle, spatialisation, scénario post, accidentel.

## SUJET DE LA THÈSE

**Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium (VI)  
aux plantes : une approche moléculaire**

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Séléna FERRERES                                                 |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                  |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SPDR / LT2S                                           |
| Référent IRSN de la thèse : | Laureline FEVRIER                                               |
| Direction de la thèse :     | Mirella DEL NERO / CNRS-IN2P3                                   |
| École doctorale :           | Université de Strasbourg - Physique et chimie-physique - ED 182 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & CNRS                                                     |

L'objectif de ce travail de thèse est d'identifier, par des analyses à l'échelle moléculaire au cours d'expériences contrôlées en laboratoire portant sur des systèmes modèles, les mécanismes encore peu connus des actions-rétroactions entre l'uranium(VI) (U(VI)), les communautés bactériennes et les matières organiques complexes (MO), - assemblages supramoléculaires de centaines de molécules organiques de propriétés et réactivité distinctes-, qui influencent la spéciation et les transferts de l'U(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes de milieux à radioactivité naturelle renforcée.

Cette thèse s'inscrit dans l'étude des effets de la spéciation sur les distributions de radionucléides dans les écosystèmes. Elle fait partie du projet structurant NEEDS-INSPECT, en lien avec l'étude du site de l'ancienne mine d'uranium de Rophin étudiée dans la ZATU (Zone Atelier Territoires Uranifères), et particulièrement d'une zone humide avec un horizon de subsurface argileux marqué par de fortes concentrations en U (>1000ppm).

Afin d'établir les liens entre spéciation et biodisponibilité de l'U(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes, nous avons réalisé une étude préalable d'un sol de la zone humide, et plus particulièrement de l'horizon argileux de sub-surface. Les résultats de cette étude montrent que l'U est mobile dans la fraction colloïdale, qui contient également des nano-minéraux d'oxyde de fer et de la MO. Cela nous a permis de définir les conditions expérimentales de systèmes modèles, aux conditions contrôlées en laboratoire, dont l'étude est toujours en cours. Ces modèles contiennent de la MO naturelle, extraite de l'horizon argileux, et un oxyde de fer (hématite), en présence ou en absence d'une population bactérienne spécifique (*Microbacterium* spp.). Des systèmes binaires (MO-U et MO-minéral) et ternaires (MO-U-minéral) ont été réalisés, puis analysés de manière quantitative par mesure du Carbone Organique Total (MO) et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) (U), et qualitativement (fluorescence).

Les résultats préliminaires montrent qu'en présence d'hématite, l'uranium favorise l'adsorption de molécules de type "humique", dont une fraction composée d'aromatiques condensées, et forme des complexes ternaires (métallo-organiques) à la surface de l'hématite. L'affinité de l'U(VI) pour les sites de surface du minéral et pour la MO contrôlent son comportement en solution. La première partie de ma troisième année de thèse a été consacrée à l'adaptation des conditions expérimentales afin de pouvoir réaliser ces systèmes en présence de bactéries, tout en gardant des conditions comparables avec les systèmes sans composante biologique.

**Mots clés :** uranium, zatu, matière organique, complexation.

## SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation  
de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés  
grâce à la géostatistique non-stationnaire

|                             |                                                                                    |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Meryem MEZIANE                                                                     |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                                         |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/SPDR/LT2S                                                                  |
| Référent IRSN de la thèse : | Léa PANNECOUCKE                                                                    |
| Direction de la thèse :     | Chantal DE FOUQUET / École des Mines de Paris (ENSMP)                              |
| École doctorale :           | Sorbonne université - Géosciences, ressources naturelles et environnement - ED 398 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                               |

Cette thèse s'inscrit dans les objectifs de la note d'orientations générales de l'IRSN visant à progresser sur les techniques de caractérisation de sites contaminés, notamment sur les méthodes géostatistiques de traitement des données. La gestion des territoires contaminés est une préoccupation majeure suite à des accidents nucléaires ou dans le cadre d'une réhabilitation d'anciens sites miniers ou industriels. Elle s'appuie sur des cartographies dont la qualité dépend des mesures effectuées (nature et densité) et de la méthode d'extrapolation utilisée. Les méthodes d'estimation usuelles supposent la stationnarité spatiale de la contamination : sa continuité spatiale et la taille caractéristique des structures de contamination sont partout identiques. Ces hypothèses sont souvent remises en cause : la géographie et les conditions de dépôt modifient localement les caractéristiques spatiales de la contamination. L'objectif de la thèse est d'établir des méthodes opérationnelles d'estimation, tenant compte de la non-stationnarité.

Le travail repose sur les données de dépôt de Cs-137 d'une campagne aéroportée réalisée après l'accident de Fukushima en 2011. Une mesure est présente tous les 40 m, le long de lignes de vol espacées de 2 km. Des simulations de l'accident ont été réalisées par l'IRSN, fournissant des valeurs de dépôts sec et humide en tant qu'information auxiliaire à utiliser dans les méthodes de géostatistique. Des données d'occupation des sols et de topographie sont également affectées à chaque mesure. Le lien entre toutes ces variables est exploré à l'échelle régionale et de tuiles de 16 km de côté. Puis, afin de combler l'information sur le dépôt, fortement lacunaire orthogonalement aux lignes de vol, différentes méthodes de géostatistique non-stationnaire sont mises en œuvre et comparées : krigeage avec dérive externe, co-krigeage, variogramme numérique, et approche SPDE (Équations aux dérivées partielles stochastiques).

L'analyse exploratoire révèle que les corrélations entre les variables sont très différentes d'une tuile à l'autre. Ces résultats soulignent l'intérêt de prendre en compte la non-stationnarité, en caractérisant les liaisons à l'échelle locale. Une étape de variographie, indispensable aux méthodes géostatistiques, est réalisée. Celle-ci a nécessité divers rééchantillonnages des données en raison de l'hétérogénéité du plan d'échantillonnage. Le rééchantillonnage restitue convenablement les variogrammes même lorsque seules 2 % des données sont conservées. Après modélisation, ces variogrammes ont été utilisés pour obtenir de premières cartes krigées. Des procédures de validation croisée sont élaborées, afin de comparer les différentes méthodes d'estimation, par krigeage ordinaire (stationnaire), dérive externe et co-krigeage.

**Mots clés :** spectrométrie gamma *in situ*, non, stationnarité spatiale, géostatistique.

> Jeudi 4 avril

08 h 15 - 09 h 00 Salle Marie Mauron

## SESSION PLÉNIÈRE

### > CONFÉRENCE SUR THÉMATIQUE TRANSVERSE

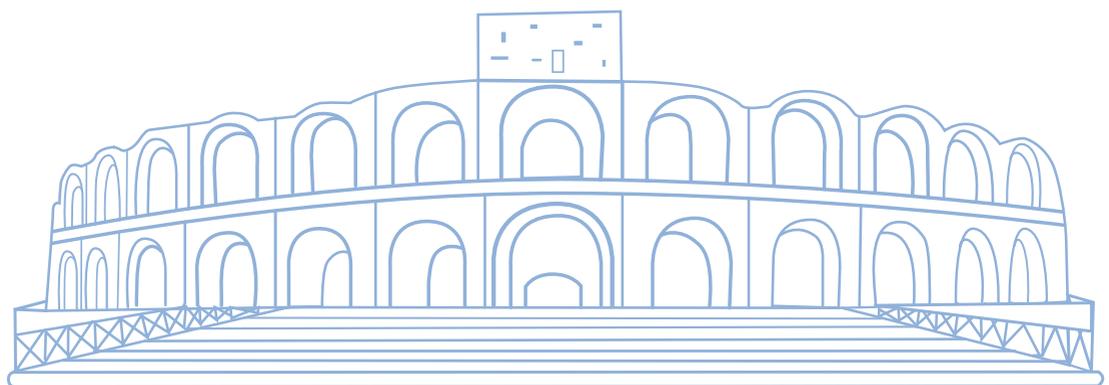
# Quelle recherche à l'IRSN en soutien à l'expertise du dossier d'autorisation de création de CIGEO

Par Christophe DEBAYLE

Adjoint au chef de Service des pollutions et des déchets radioactifs

Les recherches menées par l'IRSN dans le domaine du stockage des déchets radioactifs se concentrent principalement sur l'évaluation des aspects de sûreté et de radioprotection associés au projet CIGEO. Ces recherches visent à alimenter et conforter son expertise du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation de stockage des déchets à haute activité et à vie longue (HA-MAVL), connue sous le nom de CIGEO. Elles peuvent apparaître similaires à celles menées par l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA). Elles ont toutefois, une particularité notable car l'IRSN ne développe pas le concept de cette installation de stockage souterrain et se place donc en tiers expert. Ainsi, bien que l'IRSN ne soit pas directement impliqué dans la conception de l'installation, ses travaux de recherche visent à fournir une expertise indépendante et rigoureuse afin d'évaluer la sûreté et la robustesse du projet.

Les thèses menées par les doctorants de l'IRSN sont un maillon indispensable à la recherche de l'Institut, et apportent des connaissances précieuses qui sont ensuite intégrées dans les rapports d'évaluation de la DAC. La conférence abordera les différentes questions scientifiques posées par l'expertise menée sur l'installation CIGEO, et prendra quelques exemples dans les travaux en cours auxquels les doctorants contribuent ou ont contribué notamment sur la modélisation du comportement des radionucléides dans le stockage souterrain, l'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines, ou encore l'analyse de la stabilité géologique du site. Ces données et analyses ainsi produites sont cruciales pour évaluer la sûreté et l'impact environnemental de l'installation.



> Jeudi 4 avril

09 h 05 - 10 h 35 Salle Marie Mauron

**SESSION PARALLÈLE**

- > **SCIENCES DE LA TERRE - Modélisation des aléas naturels et de leurs impacts**  
- Analyse économique des conséquences d'un accident nucléaire

**Présidente : Oona SCOTTI**

Docteure en géophysique

**Nicolas CATHELIN** - Investigations paléosismologiques de la faille de Saint-Montan  
– Terminaison NE du faisceau de faille Cévenol.

**Antoine CHAPON** - Estimation locale et régionale des événements de pluies extrêmes  
dans un cadre multivarié et non-stationnaire.

**Occitane BARBAUX** - Températures maximales en France au 21<sup>ème</sup> siècle.

**Lisa MAMMARELLA** - Fault displacement hazard on principal fault rupture: probability  
of occurrence, slip distribution and role of surface geology.

**Rémi HANNOTEL** - Analyse macroéconomique du risque nucléaire.

SUJET DE LA THÈSE

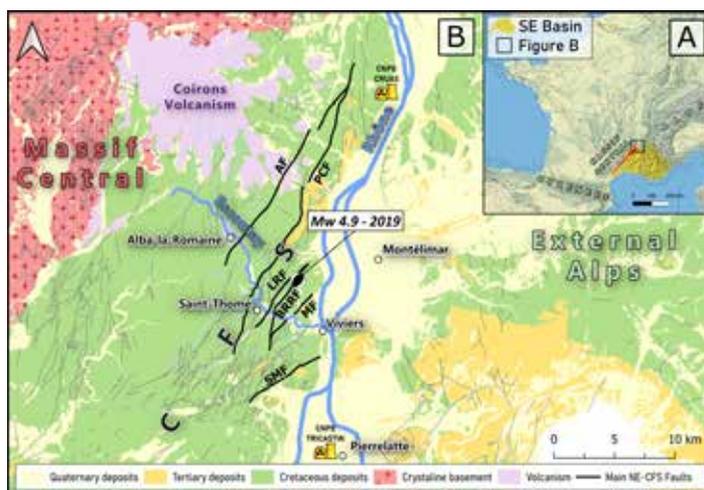
Investigations paléosismologiques de la faille de Saint-Montan  
– Terminaison NE du faisceau de faille Cévenol

Doctorant : Nicolas CATHELIN  
Date du début de la thèse : 04/10/2021  
Laboratoire IRSN : PSE-ENV/SCAN/BERSSIN  
Réfèrent IRSN de la thèse : Stéphane BAIZE  
Direction de la thèse : Jean-françois RITZ/ Géosciences Montpellier, UM2  
École doctorale : Université de Montpellier - GAIA - biodiversité, agriculture, alimentation, environnement, terre, eau - ED 584  
Financement de la thèse : IRSN

Le séisme du Teil (11.11.2019) de Mw 4.9 a produit une rupture de surface de 5km de long avec un déplacement inverse de 1.5 à 13 cm. Cet évènement a réactivé la faille de la Rouvière (LRF), une ancienne faille normale Oligocène (~25 Ma), appartenant à l'un des systèmes de failles les plus importants en France métropolitaine, le système de failles cévenol (CFS). LRF n'était pas connue comme une faille potentiellement active et n'était pas représentée dans la base de données des failles potentiellement actives (BDFA) de l'IRSN. Seules les failles des Cévennes, de Saint-Montan (SMF) et de Marsanne (MF) y étaient répertoriées comme failles potentiellement actives. Cet évènement a soulevé plusieurs questions dont: (1) savoir si LRF et les autres segments de failles du CFS ont été actifs durant le Quaternaire (0-2.5Ma); (2) celle de la réévaluation de l'aléa sismique dans la région étant donné la proximité des centrales nucléaires de Tricastin et Cruas. Ces travaux de thèse visent donc aussi à améliorer la connaissance de l'aléa sismique associée aux failles principales de la région, pour mieux estimer les mouvements vibratoires qui pourraient affecter les installations et impacter leur sûreté.

Pour répondre à ces questions et avec pour objectif d'apporter le cas échéant des informations quantitatives sur l'âge des paléoséismes, leurs mécanismes et leurs magnitudes, des tranchées ont été ouvertes sur LRF ainsi que sur les failles de Marsanne et de Saint-Montan. Plusieurs indices géologiques ont été recherchés pour évaluer l'occurrence de paléoséismes rompant la surface.

Les premières données suggèrent que LRF a effectivement produit au moins une rupture de surface entre 13.5 et 3.3ka et les études sur MF (thèse de C.Thomasset) et SMF (ma thèse) sont en cours. Ces deux thèses sont réalisés en étroite collaboration notamment du côté de l'analyse de terrain. Le travail sur la faille de Saint-Montan met en œuvre principalement l'approche paléosismologique (analyse de tranchées), avec l'aide en amont de cartographie de géophysique de sub-surface, et s'appuie également sur une analyse géomorphologique.



Les résultats préliminaires suggèrent qu'il y a bien eu une activité récente sur MF. En ce qui concerne SMF, les résultats sont moins probants et des études complémentaires sont en cours pour distinguer si les structures superficielles observées dans le quaternaire récent correspondent à des paléoruptures de surface ou s'il s'agit de phénomènes gravitaires et/ou cryo-tectoniques.

**Mots clés :**

géologie, paléosismologie, géomorphologie, quaternaire, failles, séisme.

## SUJET DE LA THÈSE

### Estimation locale et régionale des événements de pluies extrêmes dans un cadre multivarié et non-stationnaire

|                             |                                                                     |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Antoine CHAPON                                                      |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2022                                                      |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SCAN / BEHRIG                                             |
| Référent IRSN de la thèse : | Nathalie BERTRAND                                                   |
| Direction de la thèse :     | Taha OUARDA / INRS-ETE & Mathieu RIBATET / École centrale de Nantes |
| Financement de la thèse :   | INRS-ETE (Canada)                                                   |

La thèse s'inscrit dans le cadre du traitement de la question 2 « Comment mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur l'installation par des sollicitations ou agressions internes et externes et qui pourraient impacter la sûreté ? » et qui se rattache à l'Enjeu 6 du groupe thématique de Recherche sur les risques naturels qui a pour but de définir des stratégies pour l'évaluation statistique des aléas hydrométéorologiques extrêmes. La thèse vise à quantifier le risque de dépassement de niveaux élevés de pluie en France.

La caractérisation de la pluie extrême de courte durée repose sur une analyse fréquentielle locale en régime stationnaire. Cependant, le rapport AR6 du GIEC fait état d'un consensus général selon lequel le changement climatique d'origine anthropique modifie à l'échelle globale la fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les inondations.

Les travaux de recherche devraient mener au développement d'un modèle d'analyse statistique locale et / ou régionale de pluies de courtes durées qui prennent en compte les tendances et la variabilité climatique, ainsi que l'aspect multivarié de ces événements. La thèse vise également à développer des approches innovantes pour modéliser les incertitudes reliées aux modèles statistiques, et de développer des méthodes de régionalisation des modèles non-stationnaires et multivariés. L'objectif générale est d'avoir d'une part la possibilité d'estimer les événements extrêmes dans des zones où la mesure sont insuffisantes (ou même inexistantes) toute en ayant la possibilité de conforter des estimations ponctuelles, d'autre part, travailler dans un contexte de changement et de variabilité climatique. L'interaction entre les estimations locale et régionale devrait être immédiate, sans ambiguïté et facilement interprétable. L'étude prévoit la mise en œuvre de la méthodologie qui sera développée sur des sites français.

Le modèle développé est un générateur stochastique permettant de générer des séries temporelles de pluies reproduisant les caractéristiques principales des observations : la distribution marginale, l'autocorrélation et l'intermittence de la pluie. Ce modèle utilise la théorie des valeurs extrêmes, mais modélise aussi les valeurs faibles de pluie et l'absence de pluie. Ce générateur stochastique permet d'obtenir des séries temporelles alternatives aux observations mais statistiquement plausibles, à partir desquelles le risque peut être estimé. Le modèle est pour l'instant développé pour une seule station et dans un cadre stationnaire, mais sera ensuite étendu au cadre spatial et nonstationnaire. Une version paramétrique du modèle est fonctionnelle. Une version remplaçant la majorité des composants paramétriques du modèle par du deep learning sera développée dans les prochains mois.

**Mots clés :** aléas hydrométéorologiques extrêmes, générateur stochastique, variabilité climatique.

## SUJET DE LA THÈSE

### Températures maximales en France au 21<sup>ème</sup> siècle

|                             |                                                                            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Occitane BARBAUX                                                           |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SCAN / BEHRIG                                                    |
| Référent IRSN de la thèse : | Nathalie BERTRAND                                                          |
| Direction de la thèse :     | Philippe NAVEAU / CNRS & Aurélien RIBES / Météo France                     |
| École doctorale :           | Sorbonne Université - Sciences de l'environnement d'Île-de-France - ED 129 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & Météo France                                                        |

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la question 2 de la stratégie scientifique de l'IRSN « Comment mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur l'installation par des sollicitations ou agressions internes et externes (y compris naturelles) et qui pourraient impacter la sûreté ? » et se rattache à l'Enjeu 6 du Groupe Thématique de Recherche sur les risques naturels qui est « Définir des stratégies pour l'évaluation statistique des aléas hydrométéorologiques extrêmes ». Elle vise à quantifier le risque de dépassement de niveaux élevés de température, à l'échelle d'un site d'intérêt et à l'horizon 2100.

Pour caractériser la température en considérant la non-stationnarité provoquée par le changement climatique, la méthode statistique de Ribes (2020) a été retenue. Elle repose sur une construction bayésienne pour intégrer l'information des modèles climatiques sous forme d'une a-priori, qui est ensuite contrainte par des observations.

Différentes définitions de caractérisation de la température ont également été comparées en contexte de changement climatique. En effet en contexte normal, la caractérisation de cet aléa repose généralement sur une approche probabiliste. Les méthodes utilisées sont généralement adaptées au cadre non-stationnaire, sans changement climatique. Dans ce cas, la quantité d'intérêt est le niveau de retour, qui est équivalent à une température dont la probabilité annuelle de dépassement est fixée. Ainsi, il est nécessaire de choisir une quantité d'intérêt adaptée à la définition d'un niveau de sûreté représentatif de toute une période comme la Fiabilité Équivalente.

Une première application a consisté à appliquer cette méthode sur les trajectoires fournies par les modèles climatiques globaux en contraignant par les observations de stations météorologiques de bonne qualité. Au cours de l'année, l'application de la contrainte par algorithmes MCMC a été modifiée dans le but de gagner en précision et en rapidité. La construction d'une alternative aux intervalles de confiance basée sur la prédictive bayésienne est en cours.

La première application a illustré les difficultés liées à l'application locale d'une méthode reposant sur des outils créés pour l'échelle globale. Il sera ensuite utile d'explorer des méthodes permettant de mieux modéliser la composante locale, ou d'appliquer une correction des biais sur les données. Il est aussi prévu d'explorer des alternatives statistiques pour la construction de l'a priori.

**Mots clés :** statistiques, théorie des valeurs extrêmes, changement climatique, modèles de climat, observations, prédictive, MCMC, Bayésien.

## SUJET DE LA THÈSE

### Fault displacement hazard on principal fault rupture: probability of occurrence, slip distribution and role of surface geology

|                             |                                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Lisa MAMMARELLA                                         |
| Date du début de la thèse : | 01/11/2022                                              |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/SCAN/BERSSIN                                    |
| Référent IRSN de la thèse : | Stéphane BAIZE                                          |
| Direction de la thèse :     | Paolo BONCIO/Université G. D Annunzio di Chieti-Pescara |
| École doctorale :           | Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara               |
| Financement de la thèse :   | IRSN & INGV                                             |

This study is part of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) and aims to contribute towards identifying critical areas for infrastructure development and enhancing our understanding of fault-induced displacements for improved safety assessments. Seismic events pose a significant threat to sensitive facilities such as nuclear power plants, especially when located near active earthquake faults. The approach is particularly relevant for facilities unavoidably positioned along earthquake fault traces or constructed before fault discovery. Together with academia entities, IRSN engaged a long-lasting project from data collection to PFDHA code development. The goal of the approach is to estimate the location and amount of surface rupture, both on the main fault and beyond, on distributed ruptures. The latter point was completed during a former IRSN/Uni. Chieti PhD thesis, and we here focus on the main fault.

The methodological framework of PFDHA can be divided in two parts: 1) surface rupture analysis, which assess the probability of having surface rupture for a site located on principal fault; 2) quantifying the displacement resulting from the ground surface rupture. Here is discussed the first part of the analysis, namely Conditional Probability of Surface Rupture (CPSR), investigated during my first year of PhD research.

It can be adapted to assess critical zones to avoid for infrastructure construction and to estimate the probability of having a surface rupture for a structure located on the main fault. Existing solutions use empirical approach to estimate the probability of occurrence of surface rupture, but they suffer from limitations such as incomplete datasets, biases, and challenges in accounting for diverse fault geometries and tectonic settings.

To address these shortcomings, this research introduces an analytical approach that calls for global fault rupture databases, with the aim to enhance the accuracy of the prediction of the CPSR. We thus incorporate seismogenic crust properties, fault characteristics, magnitude-dependent scaling relations, hypocentral locations, and statistical distributions within the seismogenic crust. Preliminary findings show the influence of earthquake scaling relations on the probability of surface rupture, highlighting the importance of selecting appropriate input scaling relations to reduce model epistemic uncertainty. Also, the main input parameters governing the CPSR curves are represented by the seismogenic depth and the average dip angle.

The next step will involve evaluating the distribution of slip along principal fault and the impact of local geological conditions on the occurrence of principal and distributed ruptures, accounting for structural complexities, stepovers, bends, gaps, and lithology.

**Mots clés :** seismic hazard assessment, probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), surface rupture probability, global fault rupture databases, magnitude scaling relations.

## SUJET DE LA THÈSE

### Analyse macroéconomique du risque nucléaire

|                             |                                                                               |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Rémi HANNOTEL                                                                 |
| Date du début de la thèse : | 01/10/2021                                                                    |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESUC/LERN                                                            |
| Réfèrent IRSN de la thèse : | Sophie CETRE                                                                  |
| Direction de la thèse :     | Mirko WIEDERHOLT / Science Po Paris & Xavier RAGOT / CNRS                     |
| École doctorale :           | Institut études politiques de Paris – École doctorale de Sciences Po - ED 234 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                          |

---

Face au risque du dérèglement climatique, la décarbonation de notre économie est devenue un objectif central qui gouverne nos choix énergétiques. Néanmoins, la manière dont les divers risques liés au processus de décarbonation du mix énergétique sont pris en compte soulève des interrogations, notamment en ce qui concerne le risque nucléaire.

Traditionnellement, l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire repose sur le calcul de l'espérance des coûts de l'accident, soit la probabilité d'accident multipliée par les coûts associés à un tel évènement. Cette hypothèse, que l'on appelle en économie « la neutralité face au risque » serait justifiée pour des risques de plus petite ampleur, c'est-à-dire ne concernant qu'une partie de la population et pouvant être couverts par le marché de l'assurance. Au contraire, le risque nucléaire étant systémique, il se manifeste par un choc sur le niveau de production électrique et sur l'activité économique en général. Il n'est enfin que très partiellement assurable (Picard, 2013). Dans cette optique, il est essentiel d'intégrer un degré d'aversion au risque pour modéliser des choix d'investissement énergétiques optimaux.

Je développe un modèle théorique d'équilibre général dans lequel le décideur public vise à maximiser le bien-être social en faisant des choix d'investissement entre des capacités pilotables, à savoir nucléaire et thermique, tout en tenant compte du risque d'accident nucléaire. Le décideur prend en considération le comportement des consommateurs et des producteurs dans ses choix d'investissement. L'accident se traduit par un arrêt partiel ou total de la production nucléaire, une augmentation du prix de l'électricité car produite à partir du gaz, entraînant classiquement une diminution de la consommation et du pouvoir d'achat. Pour tenir compte des objectifs de politiques environnementales et de décarbonation du mix énergétique, j'intègre au modèle l'effet des politiques environnementales à travers la taxation du CO<sub>2</sub>.

Mes résultats principaux sont que l'aversion au risque diminue l'investissement nucléaire et occasionne donc un report sur les énergies fossiles. Pour enrayer ce mécanisme défavorable du point de vue climatique et économique, une taxe carbone plus élevée est nécessaire. Autrement dit, à mesure que le degré d'aversion au risque augmente la taxation optimale du CO<sub>2</sub> doit aussi augmenter.

**Mots clés :** économie, environnement, énergie, risque nucléaire, mix électrique, mix énergétique, taxation CO<sub>2</sub>.

## > Jeudi 4 avril

09 h 05 - 10 h 15 Salle Manadiers

### SESSION PARALLÈLE

#### > SANTÉ HUMAINE – Épidémiologie

**Président : François PAQUET**

Responsable de l'axe programme santé environnement

**Julie FENDLER** - Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire.

**Théo SILVESTRE** - Modélisation spatio-temporelle et outils d'IA pour l'analyse dose-réponse et la prédiction de lésions cérébrales et de troubles cognitifs radio-induits chez des patients traités par radiothérapie pour un glioblastome.

**Afi HENYOH** - Relations entre l'exposition résidentielle au radon au début de la vie et les effets sur la santé à l'âge adulte, au sein de la cohorte CONSTANCES.

**Yanis HAZEM** - Phénomènes de haute énergie dans les systèmes orageux et étude dosimétrique.

## SUJET DE LA THÈSE

Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses.  
Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire

|                             |                                                             |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Julie FENDLER                                               |
| Date du début de la thèse : | 01/11/2021                                                  |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LEPID                                        |
| Référent IRSN de la thèse : | Sophie ANCELET                                              |
| Direction de la thèse :     | Chantal GUIHENNEUC/Université Paris V - Faculté de médecine |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay – Santé publique - ED 570           |
| Financement de la thèse :   | IRSN & ORANO (PIC Epidémio)                                 |

En épidémiologie, les risques de pathologies potentiellement induites par des expositions multiples à faibles doses aux rayonnements ionisants sont peu étudiés et donc a fortiori peu connus. Cette thèse de biostatistique vise à développer des modèles probabilistes bayésiens et des algorithmes de machine learning pour la caractérisation de risques sanitaires associés à des co-expositions radiologiques à faibles doses. Elle s'inscrit dans la stratégie scientifique de l'IRSN en répondant aux questions suivantes : « Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ? » et « Comment améliorer les concepts, méthodes et outils destinés à évaluer le risque suite aux expositions des travailleurs ? ».

Le cas d'application considéré dans cette thèse est l'estimation du risque de décès par cancer du poumon dans la cohorte française des mineurs d'uranium qui, dans le cadre de leur activité professionnelle, sont simultanément exposés au radon, aux poussières d'uranium et aux rayonnements gamma. Un précédent travail de thèse a montré l'importance de considérer simultanément ces trois co-expositions radiologiques dans les estimations de risque. Pour cela un modèle de mélange bayésien par régression sur profils d'expositions (BPRM) a été développé, afin d'identifier des groupes de mineurs ayant des caractéristiques d'expositions similaires ainsi qu'un risque similaire de décès par cancer du poumon. Des problèmes persistaient quant à l'estimation du nombre de groupes. De plus, la dimension temporelle ainsi que les erreurs de mesure sur les expositions ont été ignorées dans ces premiers travaux.

Trois axes de travail ont été définis :

- Implémenter un algorithme d'inférence bayésienne plus efficace des modèles BPRM
- Étendre les modèles BPRM afin de tenir compte de la dimension temporelle des données de co-expositions
- Étendre les modèles BPRM afin de tenir compte des erreurs de mesure sur les co-expositions

Un nouvel algorithme d'inférence du modèle BPRM a été implémenté à l'aide de la bibliothèque d'accélération de code Google JAX afin d'estimer le nombre inconnu de groupes et de diminuer drastiquement les temps de calculs. Différentes méthodes de post-traitement ont également été proposées et comparées afin de stabiliser l'estimation du nombre de groupes. Une augmentation du risque de décès par cancer du poumon est mise en évidence pour deux groupes de mineurs. Le premier rassemble les mineurs ayant été fortement exposés au radon, aux rayonnements gamma et aux poussières d'uranium. Le second groupe comprend des mineurs exposés sur une longue période et ayant un âge à la première exposition faible.

**Mots clés :** épidémiologie, statistique, rayonnements ionisants, faibles doses.

## SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation spatio-temporelle et outils d'IA pour l'analyse dose-réponse et la prédiction de lésions cérébrales et de troubles cognitifs radio-induits chez des patients traités par radiothérapie pour un glioblastome**

|                             |                                                   |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Théo SILVESTRE                                    |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                        |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LEPID                              |
| Réfèrent IRSN de la thèse : | Sophie ANCELET                                    |
| Direction de la thèse :     | Sophie ANCELET / IRSN & Florence FORBES / INRIA   |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay – Santé publique - ED 570 |
| Financement de la thèse :   | projet ANR RADIO-AIDE                             |

Cette thèse de biostatistique s'inscrit au sein du projet ANR « RADIO-AIDE ». Elle vise à développer des modèles probabilistes spatio-temporels (ST) et des algorithmes d'apprentissage pour mieux comprendre les mécanismes neurotoxiques sous-jacents à l'apparition de lésions cérébrales et de troubles cognitifs chez des patients traités par radiothérapie (RT) pour un glioblastome. La thèse s'appuie sur les données de la cohorte EpiBrainRad qui inclut actuellement 250 patients traités pour un glioblastome à l'hôpital de la Pitié Salpêtrière ou à l'Institut de Cancérologie de Strasbourg Europe. La toxicité potentielle de la RT cérébrale sur le système nerveux central fait partie des questions de recherche prioritaires de l'IRSN en radioprotection concernant l'identification et la prévention des effets secondaires dits "non-cancer" résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants (RI) à des fins thérapeutiques. Pour atteindre cet objectif, la thèse est découpée en 3 axes de recherche spécifiques :

1. Estimer l'association potentielle entre la progression ST de lésions cérébrales post-RT et la répartition spatiale de la dose de RI absorbée au cerveau. Pour ce faire, nous proposons une modélisation de type mélange d'experts, basée sur une régression logistique par morceaux et différentes modélisations spatiales (modèle de Potts caché, modèle conditionnel autorégressif) pour tenir compte de la répartition spatiale de la dose et des lésions cérébrales.
2. Ajouter une prise en compte de l'apparition de troubles cognitifs post-RT. Cela implique d'étendre le(s) modèle(s) précédemment proposé(s) en décrivant des données de scores cognitifs évalués en différents temps de suivi et en tenant compte du statut tumoral du patient.
3. Prédire l'occurrence individuelle de troubles cognitifs à un stade précoce post-RT, avec une quantification des incertitudes de prédiction associées. Cela impliquera de comparer les prédictions obtenues avec les modèles probabilistes ST précédemment définis aux prédictions obtenues à partir du développement d'une approche par *Deep Learning* bayésien.

Un intérêt méthodologique majeur de cette thèse est l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions des patients aux RIs. En effet, nous devons travailler à la fois avec un petit nombre d'individus (restreignant pour la prédiction de troubles cognitifs) et une grande quantité de données (plus de  $1e07$  valeurs par image/IRM). C'est pourquoi nous avons opté pour le cadre statistique bayésien, et le C++ pour optimiser les temps de calculs et la mémoire utilisée. Plusieurs algorithmes d'apprentissage (VBEM, MCMC, et SMC) sont implémentés et comparés sur données simulées et sur celles de la cohorte EpiBrainRad.

**Mots clés :** biostatistique, statistique bayésienne, modélisation spatio temporelle, rayonnements ionisants, radiothérapie, radioprotection.

## SUJET DE LA THÈSE

**Relations entre l'exposition résidentielle au radon au début de la vie et les effets sur la santé à l'âge adulte, au sein de la cohorte CONSTANCES**

|                             |                                                   |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Afi HENYOH                                        |
| Date du début de la thèse : | 02/11/2022                                        |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LEPID                              |
| Référent IRSN de la thèse : | Enora CLERO                                       |
| Direction de la thèse :     | Olivier LAURENT/IRSN                              |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay - Santé publique - ED 570 |
| Financement de la thèse :   | H2020 RADONORM                                    |

L'effet cancérigène pulmonaire du radon est aujourd'hui bien documenté chez les mineurs et en population générale (WHO 2009). Toutefois, des questions se posent quant à de possibles autres effets sanitaires du radon tels que certains cancers non-pulmonaires ou encore des pathologies non cancéreuses. De plus, les relations entre l'exposition au radon à différents stades de la vie (enfance, puberté...) et les effets cancérigènes tardifs (à l'âge adulte) restent mal caractérisées.

C'est à ces questions de recherche que le projet de thèse cherche à répondre en exploitant les données d'environ 76 000 participants de la cohorte Constances inclus entre 2012 et 2017, pour lesquels sont disponibles l'historique résidentiel complet depuis la naissance, les informations sur des facteurs de risque de maladies chroniques, ainsi que les données sur les événements de santé d'intérêt survenus au cours du suivi. Ceci permettra d'estimer les risques de cancers et de pathologies non-cancéreuses potentiellement associés à l'exposition résidentielle au radon cumulée durant l'enfance, dans le but d'améliorer les connaissances sur les effets sanitaires de l'exposition chronique à de faibles doses de radon, à des fins d'expertises et de décisions (question N°1 de la stratégie scientifique de l'IRSN en radioprotection : "Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ?")

La première année de la thèse a principalement consisté à réaliser une revue systématique et une méta-analyse. Au total 132 études ont été incluses dans la revue systématique, et 46 dans la méta-analyse. Dans l'ensemble, la méta-analyse n'a pas montré d'association statistiquement significative entre le radon et les maladies autres que le cancer pulmonaire, bien que l'association soit proche de la significativité pour certains sites de cancer (par exemple, foie, intestin et rectum, peau, testicule, œsophage, bouche et pharynx).

Les prochaines étapes prévues pour l'année 2 sont : la finalisation de la rédaction de l'article sur la revue bibliographique, la finalisation de la préparation des données de la cohorte, en particulier la reconstitution de l'exposition au radon depuis la naissance (croisement des codes Insee des communes depuis la naissance jusqu'à 2020 et d'une cartographie des concentrations de radon) et l'identification des événements de santé dans le SNDS ; puis l'étude des relations entre l'exposition au radon résidentielle durant l'enfance et différentes pathologies cancéreuses, circulatoires, et pulmonaires en utilisant notamment des modèles de survie et/ou de régression de Poisson. L'année 3 sera consacrée au risque de maladie neurodégénérative et à la rédaction du manuscrit de thèse.

**Mots clés :** radon, cohorte CONSTANCES, cancers, maladies cardiovasculaires, maladies pulmonaires, maladies neurodégénératives.

## SUJET DE LA THÈSE

## Phénomènes de haute énergie dans les systèmes orageux et étude dosimétrique

|                             |                                                                                            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Yanis HAZEM                                                                                |
| Date du début de la thèse : | 01/10/2022                                                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SDOS/LDRI                                                                          |
| Référent IRSN de la thèse : | François TROMPIER                                                                          |
| Direction de la thèse :     | Sébastien CELESTIN/CNRS Orléans                                                            |
| École doctorale :           | Université d'Orléans – Énergie – Matériaux - Sciences de la terre et de l'univers - ED 552 |
| Financement de la thèse :   | CNRS, IRSN, Région Centre                                                                  |

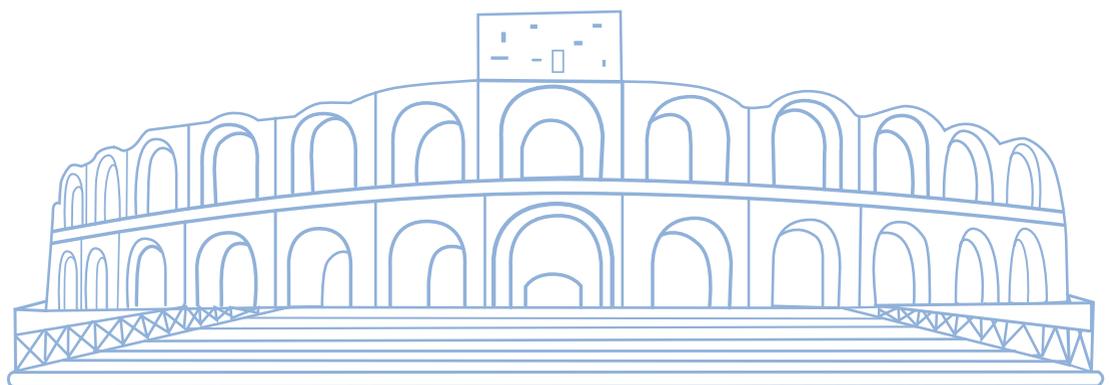
Ce projet de thèse s'inscrit dans la thématique du GTR1, notamment sur la troisième grande question scientifique relative à la radioprotection humaine qui consiste à améliorer les outils destinés à évaluer les risques aux expositions des travailleurs. Il vise à quantifier l'exposition des personnels navigants aux phénomènes radiatifs d'origine électrique produits dans les orages tels que les « *Terrestrial Gamma ray Flashes* » (TGF) et « *Gamma ray Glows* » (GRG).

Il s'agit de développer une approche basée sur de la mesure pour évaluer les modèles et calculs utilisés dans une thèse précédente pour l'évaluation des doses. Un spectromètre (XStorm) spécifiquement développé pour la mesure et la détection des flashes (~100  $\mu$ s) d'électrons et de RX de haute énergie (40 MeV) ainsi que des neutrons secondaires produits est associé à un moulin à champ pour corrélérer les émissions X avec les variations des champs électriques. Les instruments seront déployés d'une part lors des campagnes CNES Stratéole-2 pour observer ces phénomènes depuis la stratosphère et OREO ou plusieurs ballons sondes seront lâchés simultanément.

XStorm est un spectromètre compact qui détecte les photons entre 0.4 et 20 MeV. Chaque particule détectée est datée avec une précision temporelle de 600 nS. XStorm est composé de deux scintillateurs montés sur SiPM : un BGO pour les photons de haute énergie et un scintillateur plastique EJ276 pour la détection des neutrons par « *pulse shape discrimination* ». Les deux scintillateurs sont compensés en température. La phase initiale de la thèse s'est concentrée sur la finalisation de la nacelle OREO et sur la calibration et fiabilisation des détecteurs. La linéarité des deux analyseurs multicanaux (ADC12 bits + FPGA) utilisés a été vérifiée sur toute la gamme d'énergie des particules susceptibles d'être produites par les TGF et les GRG. Compte tenu de la très mauvaise résolution en énergie du plastique, une approche s'appuyant sur la caractérisation des fronts Compton de sources gamma et des muons a été utilisée. Concernant le moulin à champ, qui mesure un champ électrostatique, l'étalonnage a été réalisé en l'incorporant dans la nacelle OREO afin de prendre en compte les perturbations engendrées par celle-ci. Les instruments sont intégrés dans une coque sphérique en polystyrène revêtue intégralement d'un film d'aluminium afin de protéger l'électronique du bruit électromagnétique.

Dans cette présentation, nous présenterons les campagnes Stratéole-2 et OREO, les systèmes physiques étudiés (TGF et GRG), ainsi que les travaux effectués durant la première année de la thèse.

**Mots clés :** TGFs, RREA, scintillator, EFM.



> Jeudi 4 avril

10 h 50 - 11 h 45 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> **SANTÉ ENVIRONNEMENT - Populations sur sites contaminés**

**Président : Jean-Marc BONZOM**

Docteur en radioécologie

**Léa DASQUE** - Étude des effets de la radiocontamination de l'environnement sur l'écophysiologie d'un amphibien, la rainette arboricole.

**Pierre TECHER** - Étude intégrative des effets des rayonnements ionisants sur la valeur sélective et la fonction écologique d'un consommateur secondaire planctonique.

**Elen GOUJON** - Identification de marqueurs moléculaires de la radiation à faibles doses à partir de données mutli-omiques.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude des effets de la radiocontamination de l'environnement sur l'écophysiologie d'un amphibien, la rainette arboricole

|                             |                                                                                  |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Léa DASQUE                                                                       |
| Date du début de la thèse : | 16/11/2022                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SERPEN / LECO                                                          |
| Référent IRSN de la thèse : | Sandrine FRELON & Jean-Marc BONZOM                                               |
| Direction de la thèse :     | Nathalie MONDY / Université Lyon I                                               |
| École doctorale :           | Lyon COMUE - Évolution, Écosystèmes, Microbiologie, Modélisation (E2M2) - ED 341 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                             |

Les accidents nucléaires majeurs, tels que Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011), ont entraîné d'importants rejets radioactifs dans l'environnement, ce qui engendre une exposition chronique sur plusieurs générations de la faune présente sur ces territoires. L'IRSN a pour objectif, entre autres, de mesurer et comprendre l'impact de la contamination radioactive de l'environnement sur la biodiversité et ainsi contribuer à l'établissement de seuil de décision pour la protection de l'Environnement (problématique prioritaire n°1 de sa Stratégie Scientifique).

Ainsi une étude chez des rainettes (*Hyla orientalis*) vivant dans les zones contaminées de Tchernobyl (débit de dose total :  $0,001\mu\text{Gy/h} - 39,3\mu\text{Gy/h}$ ) a notamment montré par transcriptomique une altération du métabolisme énergétique 30 ans après l'accident nucléaire ; résultat partagé par d'autres études sur poissons et rongeurs. Le métabolisme jouant un rôle crucial dans l'allocation de l'énergie entre les grandes fonctions biologiques de l'organisme, i.e. la survie, la croissance, la reproduction et la maintenance, il est essentiel d'évaluer si ces signatures moléculaires se retrouvent à l'échelle physiologique.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les effets de la radiocontamination dans la Préfecture de Fukushima sur l'écophysiologie d'une rainette, *Dryophytes japonicus*, et plus précisément sur son métabolisme énergétique, treize ans après l'accident de Fukushima. Pour cela, nous avons étudié l'impact d'un gradient de radio-contamination (débit de dose total :  $0,001\mu\text{Gy/h} - 1,7\mu\text{Gy/h}$ ) sur l'activité de plusieurs enzymes impliquées dans les voies aérobies et anaérobies du métabolisme énergétique, notamment la citrate synthase et la lactate déshydrogénase, respectivement. Ces activités ont été mesurées dans les muscles thoraciques et dans le foie de rainettes mâles collectées en période de reproduction. Dans les muscles thoraciques, très fortement sollicités pour le chant en période de reproduction, l'activité de la citrate synthase et de la lactate déshydrogénase augmentent avec la dose de rayonnements ionisants absorbée par les rainettes. Ceci pourrait suggérer une réponse des métabolismes aérobie et anaérobie ajustés pour faire face aux demandes énergétiques accrues en période de reproduction et compenser les coûts énergétiques liés à la dose reçue. Dans le foie, organe de détoxification, nous n'observons pas d'effet de la dose de radioactivité sur les activités enzymatiques, ce qui suggérerait aucune augmentation énergétique liée à la maintenance due à la dose.

Afin d'approfondir ces résultats, nous évaluerons les conséquences écologiques de la possible modification de la physiologie des animaux en lien avec la production de signaux sexuels secondaires des rainettes (comme le chant) qui sont très coûteux en termes d'énergie.

**Mots clés :** rainette, radioactivité, métabolisme.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude intégrative des effets des rayonnements ionisants sur la valeur sélective et la fonction écologique d'un consommateur secondaire planctonique

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Pierre TECHER                                                   |
| Date du début de la thèse : | 04/10/2021                                                      |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SERPEN / LECO                                         |
| Référent IRSN de la thèse : | Frederic ALONZO                                                 |
| Direction de la thèse :     | Stuart AULD / University of Stirling, Stirling                  |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                            |

La compréhension des effets à long terme de faibles doses de rayonnements ionisants sur les écosystèmes, les espèces qui les composent et dans des conditions écologiquement pertinentes reste un enjeu majeur pour la recherche en environnement à l'IRSN. Par exemple, dans la Zone d'Exclusion de Tchernobyl (CEZ), les études du crustacé planctonique *Daphnia pulex* (espèce clé du milieu aquatique) montrent que les populations vivant dans des lacs exposés à des débits de dose de 0,01 µGy/h à 200 µGy/h, ne présentent aucune différence significative en termes de survie et de reproduction. Les analyses moléculaires mettent en évidence une corrélation positive entre débit de dose et diversité génétique, suggérant que les mutations radio induites pourraient, dans la CEZ, agir comme une source de diversité génétique.

Dans ce contexte, ce projet de thèse couple approche mécaniste, biologie évolutive, et écologie fonctionnelle pour tester expérimentalement à l'aide d'une population monoclonale naïve de *D. pulex* (TCO) les observations de terrain faites sur cette espèce. On cherche à comprendre comment l'irradiation gamma affecte *D. Pulex* de l'échelle individuelle à celle de la population et au cours de plusieurs générations.

Pour ce faire, on expose des populations de *D. pulex* à 6 débits de dose (Contrôle, 5 µGy/h, 50 µGy/h, 500 µGy/h, 5 mGy/h et 50 mGy/h) pendant plusieurs générations. Un suivi quotidien de la survie et reproduction est effectué, ainsi que des mesures régulières de la taille des individus. Les effets observés seront analysés à l'aide de modèles toxico-cinétiques toxico-dynamiques (TKTD) et les risques pour la fitness et la consommation secondaire seront évalués. Les échantillons en vue des analyses moléculaires sont prélevés à la fin de chaque génération.

Les premiers résultats mettent en évidence une réponse complexe sur deux générations : les individus exposés à de faibles débits de doses semblent montrer une croissance et un taux de reproduction plus élevés lors de première génération, puis aucun effet dans la seconde. Les individus exposés aux débits de doses maximum, eux, montrent d'abord un effet négatif des rayonnements ionisants sur ces mêmes traits d'histoire de vie, qui s'efface à la génération suivante. On note que les effets indirects liés à la croissance de la nourriture compliquent l'interprétation des résultats et la dernière expérimentation réalisée, dont les résultats sont en cours d'analyse, teste de façon plus contrôlée les réponses des individus irradiés dans un milieu sans croissance des algues.

**Mots clés :** *Daphnia pulex*, radiotoxicité, fonction écologique, fitness.

## SUJET DE LA THÈSE

Identification de marqueurs moléculaires de la radiation à faibles doses  
à partir de données multi-omiques

|                             |                                                                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Elen GOUJON                                                                                                   |
| Date du début de la thèse : | 02/11/2022                                                                                                    |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LRTOX                                                                                          |
| Référent IRSN de la thèse : | Imène GARALI ZINEDDINE & Olivier ARMANT                                                                       |
| Direction de la thèse :     | Arthur TENENHAUS/ Centrale Supélec                                                                            |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay – Sciences et Technologies de l'Information<br>et de la Communication (STIC) - ED 580 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                          |

Aujourd'hui, plus de trente ans après l'accident nucléaire de Tchernobyl, l'étude des effets d'une exposition chronique à des faibles doses sur la faune sauvage s'inscrit dans la première mission de l'IRSN en matière de radioprotection (question 1 de la stratégie scientifique). Les populations de rainettes arboricoles *Hyla orientalis* échantillonnées en 2018 dans la Zone d'Exclusion de Tchernobyl (ZET) subissent des changements populationnels associés à l'exposition aux radionucléides présents dans l'environnement [Car 2023]. Afin d'améliorer la compréhension des effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur les êtres vivants, ce projet de thèse en bio-statistiques vise à proposer des méthodes pour une analyse holistique des effets à partir de données complexes et hétérogènes disponibles (données individuelles, données multi-omiques, génétique des populations).

Le premier axe porte sur la gestion des facteurs tels que le site géographique d'origine et la diversité génétique qui confondent l'analyse des effets biologiques.

Par la suite, nous chercherons à développer un cadre statistique pour l'analyse de données omiques qui permette de prendre en compte les facteurs confondants.

Enfin, les différentes modalités d'information feront l'objet d'une analyse jointe en relation avec le débit de dose. Les méthodes proposées seront éprouvées sur les données multi-omiques disponibles sur les rainettes ainsi que sur données simulées grâce à la station de calcul intensif du LRTOX. Une étude exploratoire des données transcriptomiques a permis de mettre en évidence que les méthodes classiques de gestion des effets de groupe (ou « effets batch ») sont vaines en raison de la forte relation entre le site et le débit de dose. En tant que paramètre pouvant varier entre les sites et donc en partie justifier cet effet confondant, la distance génétique entre individus a été utilisée comme proxy de la diversité génétique observable dans les différents sites géographiques. La matrice de distance génétique interindividuelle a été résumée en un facteur par clustering hiérarchique. L'intégration de la distance génétique dans l'analyse a permis de gérer le facteur confondant du site et de mettre en lumière l'impact de l'exposition chronique actuelle aux rayonnements ionisants sur les rainettes arboricoles.

Le second axe de ce projet poursuit ces travaux sur les effets confondants à travers le développement de méthodes statistiques pour les données structurées en groupes d'individus. En s'inscrivant dans le cadre statistique du *Regularized Generalized Canonical Correlation Analysis* (RGCCA), la méthode multi-groupe [Tenenhaus 2014] a été implémentée en R et pourra être appliquée aux données omiques du projet.

**Mots clés :** multi omiques, intégration de données, biologie des systèmes, faibles doses.

> Jeudi 4 avril

10 h 50 - 11 h 55 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

> MÉDECINE - Expositions médicales - séquelles de radiothérapies

**Présidente: Agnès FRANÇOIS**

Docteure en physiologie/physiopathologie

**Sarmini BAVANANTHAN** - Réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire lors d'une irradiation pulmonaire en conditions stéréotaxiques : focus sur les cellules club.

**Claire LAGO** - Réponse de l'endothélium vasculaire à l'irradiation *in vivo* : intérêt pour la prédiction du risque de toxicité après radiothérapie.

**Arthur THOMAS-JOYEUX** - La réponse aux dommages de l'ADN dans le maintien de la stabilité myotubulaire après exposition aux rayonnements ionisants.

**Anne-laure POULIET** - Thérapie cellulaire par les cellules souches mésenchymateuses (CSM) des atteintes tissulaires de la vessie après radiothérapie.

## SUJET DE LA THÈSE

**Réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire lors d'une irradiation pulmonaire en conditions stéréotaxiques : focus sur les cellules club**

|                             |                                                                            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Sarmini BAVANANTHAN                                                        |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SERAMED/LRMed                                                      |
| Référent IRSN de la thèse : | Agnès FRANCOIS                                                             |
| Direction de la thèse :     | Agnès FRANCOIS/IRSN                                                        |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay – Cancérologie, biologie, médecine, santé - ED 582 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                       |

Le LRMed a développé un modèle préclinique d'irradiation de petits volumes pulmonaires chez la souris. Ce modèle mime les nouveaux protocoles de radiothérapie pulmonaire dite en « conditions stéréotaxiques ». L'objectif est d'étudier la réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire, en particulier après de fortes doses d'irradiation sur de petits volumes de poumon de souris, en mettant en lumière le rôle des cellules Club dans le développement des lésions pulmonaires radio-induites. Ce projet s'insère dans l'un des enjeux de l'IRSN qui vise à identifier et prévenir les effets secondaires des rayonnements ionisants.

La thèse se déroule en trois parties. Premièrement, un modèle de déplétion chimique des cellules club, transitoire ou maintenue, est utilisé afin de déterminer l'impact des cellules club sur le développement des lésions radio-induites pulmonaires. Deuxièmement, nous suivons par séquençage ARN sur cellules uniques les profils d'expression génique des populations cellulaires de l'épithélium bronchiolique en réponse aux rayonnements ionisants. Enfin, l'administration d'utéroglobine recombinante chez les souris irradiées permettra de déterminer si l'impact des cellules club sur le développement des lésions pulmonaires dépend de la sécrétion de cette protéine. Chez les souris C57Bl6/J, une déplétion transitoire des cellules Club est induite par l'injection intrapéritonéale de naphtalène, NA, (ou d'huile de maïs, CO, son véhicule). L'irradiation est réalisée au SARRP, en utilisant un faisceau collimaté de 3x3mm<sup>2</sup> et une dose unique de 80 Gy délivrée en arc sur le poumon gauche, générant une inflammation aiguë focale et une fibrose pulmonaire. L'irradiation est effectuée soit 3 jours après l'injection de naphtalène, au nadir des cellules club, soit 14 jours après l'injection de naphtalène, lorsque celles-ci sont réapparues. Le tissu pulmonaire est étudié 1 mois (inflammation) et 6 mois (fibrose) après l'exposition, à l'aide de scanners thoraciques et d'analyses anatomopathologiques et immunohistologiques.

Un mois post-exposition, nous observons une opacification du volume cible, révélant une inflammation tissulaire sévère, associée à une désorganisation complète de l'architecture pulmonaire. La zone lésée est caractérisée par une perte des cellules club et une réduction globale du nombre de cellules épithéliales bronchioliques. Les souris traitées au NA présentent des lésions tissulaires plus diffuses, avec un épaississement septal significativement plus important, suggérant un rôle protecteur des cellules club. L'analyse micro-CT révèle une moindre opacification tissulaire, confirmant la nature diffuse de la lésion. L'irradiation des souris après le retour des cellules club a effacé les différences de dommages tissulaires observés, suggérant que le repeuplement des cellules Club se fait avec des cellules pleinement fonctionnelles.

**Mots clés :** irradiation stéréotaxiques, poumon, cellules club, inflammation, fibrose.

## SUJET DE LA THÈSE

Réponse de l'endothélium vasculaire à l'irradiation *in vivo* : intérêt pour la prédiction du risque de toxicité après radiothérapie

|                             |                                                                            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Claire LAGO                                                                |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                 |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SERAMED/LRMed                                                      |
| Référent IRSN de la thèse : | Olivier GUIPAUD                                                            |
| Direction de la thèse :     | Olivier GUIPAUD/IRSN                                                       |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay – Cancérologie, biologie, médecine, santé - ED 582 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & EDF                                                                 |

La radiothérapie, bien que cruciale dans le traitement du cancer, induit des dysfonctionnements de l'endothélium vasculaire. Les cellules endothéliales, en recrutant les cellules immunitaires, régulent l'inflammation et la réponse immunitaire par la production de molécules d'adhésion et d'activation. Cependant, le recrutement chronique de cellules immunitaires en réponse à la radiothérapie peut avoir des effets néfastes sur les tissus sains. La réponse moléculaire des cellules endothéliales aux radiations *in vitro* est bien caractérisée, mais leur implication dans la réponse immunitaire *in vivo* reste peu comprise.

Par une approche de séquençage de l'ARN de cellules uniques (scRNA-seq), cette étude vise à décrypter la réponse moléculaire des cellules endothéliales pulmonaires de souris irradiées et explorer leurs interactions avec les cellules immunitaires pour mieux comprendre leur rôle dans la réponse immunitaire. Les souris ont été exposées à une irradiation du thorax entier à 18 Gy (10 MV, 2,5 Gy/min) avec un LINAC pour induire une fibrose pulmonaire, puis étudiées 7 jours, 3 mois et 6 mois après l'irradiation et comparées à des souris non exposées au même temps. Les cellules immunitaires (CD45+) et les cellules endothéliales (CD45-CD31+) ont été isolées à partir de la dissociation pulmonaire, et le scRNA-seq (technologie 10X Genomics) pour identifier les types cellulaires et l'expression génique à l'aide des outils SEURAT, ICELLNET et CellChat sur RStudio.

L'analyse histologique et l'imagerie micro-CT ont permis de caractériser la fibrose pulmonaire et la cytométrie en flux de confirmer une diminution significative du nombre de cellules endothéliales six mois après l'irradiation, suggérant une perte cellulaire en faveur de la fibrose. Les cellules endothéliales provenant de souris irradiées et mises en culture ont montré une incapacité à proliférer, indiquant des altérations causées par l'irradiation. L'analyse bioinformatique a permis d'explorer l'expression génique des cellules endothéliales et de cellules immunitaires pour les 24 souris de l'étude (4 souris par temps et par dose d'irradiation). Les résultats ont révélé des changements d'expression génique des cellules endothéliales ainsi que des altérations dans les interactions avec les cellules immunitaires post-irradiation. L'étude prévoit ensuite d'irradier des souris à énergie (irradiation au SARRP, 220 kV) et débit de dose (irradiation FLASH, à Gustave Roussy) différents pour étudier l'impact des traitements sur la réponse des cellules endothéliales et la réponse immunitaire. Ce projet, intégré aux enjeux de l'IRSN visant à mieux identifier les effets secondaires des rayonnements ionisants, pourrait renforcer la capacité à prédire l'impact et les risques des traitements utilisant ces rayonnements.

**Mots clés :** radiothérapie, endothélium, réponse immunitaire.

## SUJET DE LA THÈSE

## La réponse aux dommages de l'ADN dans le maintien de la stabilité myotubulaire après exposition aux rayonnements ionisants

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Arthur THOMAS-JOYEUX                                            |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                      |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN / SERAMED / LRAcc                                       |
| Référent IRSN de la thèse : | Céline BALDEYRON                                                |
| Direction de la thèse :     | Marc BENDERITTER / IRSN                                         |
| École doctorale :           | Sorbonne Paris Cité - Bio Sorbonne Paris Cité (BIOSPC) - ED 562 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                            |

Mon projet de thèse, rattaché au nouvel Axe-Programme "Vers une utilisation sûre et optimisée des rayonnements ionisants (RI) en médecine", répond à la question 5 de la stratégie scientifique de l'IRSN, qui cherche à identifier et prévenir les effets secondaires des RI utilisés à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Le muscle squelettique représentant jusqu'à 40% de notre masse corporelle est l'un des tissus le plus souvent retrouvé dans le champ d'irradiation. Avec l'allongement de la survie des patients atteints de cancer, l'apparition de lésions musculosquelettiques est de plus en plus rapportée comme séquelles tardives des traitements par radiothérapie. Ma thèse a pour objectif de mieux comprendre les mécanismes moléculaires permettant aux cellules du muscle strié squelettique de maintenir la coordination cellulaire et donc l'homéostasie du tissu musculaire après expositions aux RI.

Dans le muscle sain, les cellules souches musculaires jouent un rôle crucial dans le maintien de son homéostasie et de sa régénération. Pour étudier l'impact d'une exposition aux RI sur l'homéostasie musculaire, j'ai réalisé différents tests *in vitro* de mesure de capacité myogénique à partir de cellules souches immortalisées (C2C7) ou primaires issus de souris C57BL/6J. Après irradiation globale (LINAC : 0/5/10Gy, rayon X 10MeV), mes données montrent une baisse significative des capacités de prolifération, de différenciation et de fusion des cellules myogéniques proportionnellement à la dose.

Pour étudier la réponse aux dommages radio-induits de l'ADN dans les cellules myogéniques, j'ai analysé le recrutement de la protéine HP1 $\alpha$  (impliquée entre autres dans la réparation de l'ADN) au site des cassures de l'ADN induit localement dans le noyau des cellules C2C7 (Microfaisceau d'ions : proton 4MeV ou particule  $\alpha$  6MeV). Mes données montrent que la réponse aux dommages radioinduits diminue en fonction de l'état de différenciation myogénique et du nombre de particules utilisées.

Afin de caractériser la communication des cellules irradiées vers les cellules voisines nonirradiées / ciblées, j'ai posé l'hypothèse que les exosomes soient impliqués dans la propagation d'un signal extracellulaire pour le maintien de l'homéostasie musculaire. Des résultats préliminaires montrent que l'utilisation d'un inhibiteur de leur biogénèse (GW4869) induit une réponse différentielle sur l'accumulation de HP1 $\alpha$  aux sites d'irradiation localisée. En parallèle, j'ai réalisé des isolations d'exosomes, dont le contenu en protéines est en cours d'analyse. La prochaine étape sera d'étudier l'impact de ces exosomes sur la réponse aux dommages de l'ADN dans les cellules myogéniques préalablement irradiées ou non pour évaluer leur potentiel radio-protecteur ou radio-sensibilisant.

**Mots clés :** radiothérapie, muscle strié squelettique, dommage radio, induit, ADN, chromatine.

## SUJET DE LA THÈSE

## Thérapie cellulaire par les cellules souches mésenchymateuses (CSM) des atteintes tissulaires de la vessie après radiothérapie

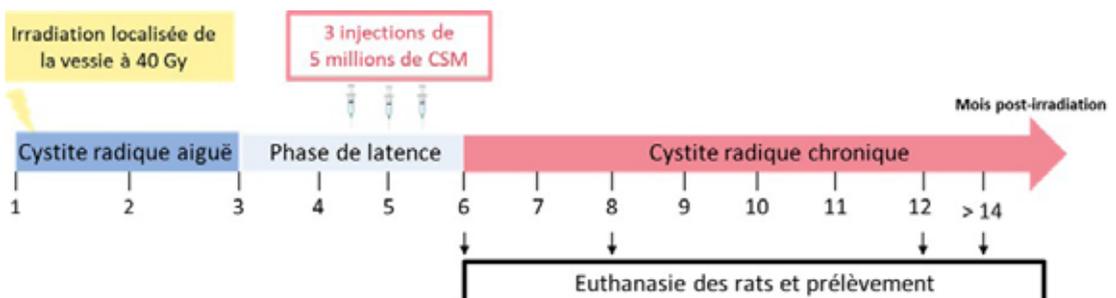
|                             |                                                                             |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Anne-Laure POULIET                                                          |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                  |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SERAMED/LRMed                                                       |
| Référent IRSN de la thèse : | Alain CHAPEL                                                                |
| Direction de la thèse :     | Alain CHAPEL/IRSN                                                           |
| École doctorale :           | Sorbonne université - Physiologie, physiopathologie, thérapeutique - ED 394 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                        |

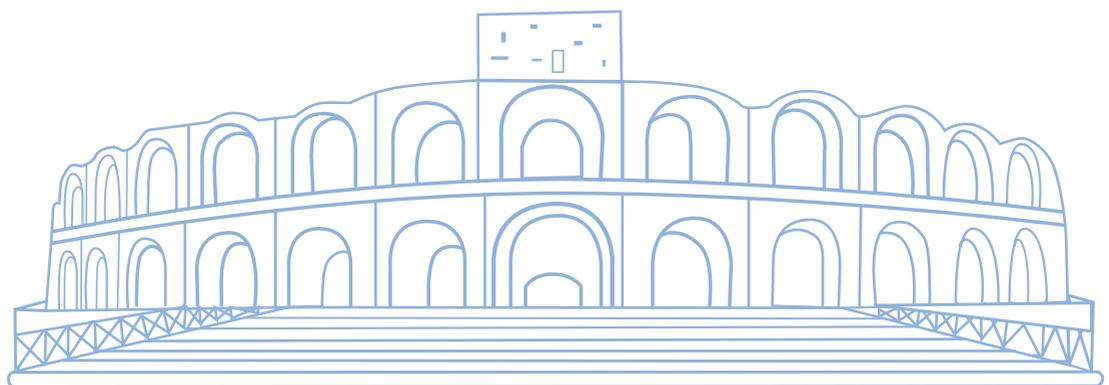
La cystite radique chronique (CRC) est une pathologie consécutive à une radiothérapie pelvienne. Elle est caractérisée par une inflammation chronique de la vessie, avec des symptômes tels que la douleur et les saignements. Les études antérieures ont montré que la thérapie par les cellules stromales mésenchymateuses (CSM) est un traitement d'autres pathologies de la vessie comme la cystite interstitielle et de la cystite hémorragique. Les CSM pourraient constituer une stratégie thérapeutique. Ce projet s'inscrit dans l'un des enjeux de l'IRSN qui vise à identifier et à prévenir les effets secondaires des rayonnements ionisants.

Un modèle de CRC a été développé chez le rat afin d'évaluer l'effet du traitement par les CSM sur cette pathologie. L'irradiation de la vessie entière avec une dose totale de 40Gy à l'aide de deux faisceaux est réalisée en utilisant une plateforme d'irradiation pour petits animaux (SARRP). Afin de potentialiser l'effet du traitement, les CSM sont injectées de manière répétée par voie intraveineuse avant le développement de la cystite radique chronique. Des analyses physiologiques, histologiques et transcriptomiques sont réalisées. Au niveau physiologique, le traitement par les CSM semble réduire significativement l'incontinence urinaire, lors de la CRC (6 mois après l'irradiation). Une diminution significative du nombre de lésion vasculaires de la vessie (à 12 mois post-irradiation) est également observée par cytoscopie. Les études histologiques, au niveau de la paroi interne de la vessie, montrent que le traitement par les CSM induit une diminution des hyperplasies (augmentation du nombre de cellules de l'urothélium) lors du début de la phase chronique. L'étude de l'imperméabilité et du renouvellement de l'urothélium ont révélé que le traitement permet la différenciation des cellules basales en cellules superficielles, conduisant ainsi à l'imperméabilisation de l'urothélium. En revanche, en absence de traitement, l'irradiation augmente significativement de nombre de cellules basales qui ne semblent pas se différencier en cellules superficielles.

Nos résultats montrent que le traitement par les CSM pourrait limiter la progression de la phase chronique de la cystite radio-induite. Ce traitement pourrait offrir une option thérapeutique aux patients atteints de CRC résistante aux traitements conventionnels.

**Mots clés :** cystite radique, cellules stromales mésenchymateuses, radiothérapie.





> Jeudi 4 avril

14 h 30 - 15 h 45 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Perméabilité des ouvrages

**Président: Mejdî NEJÎ**

Docteur en physico-chimie des matériaux

**Omar NAJJAR** - Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave.

**Kayani GANESHALINGAM** - Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz dans les argilites.

**Maiwenn HUMBEZI DESFEUX** - Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux.

**Mohamed Haythem BAHLOULI** - Coupled Modeling of Water-Gas Flow and Hydro-Mechanics in a Deep Geological Repository for Radioactive Waste.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave

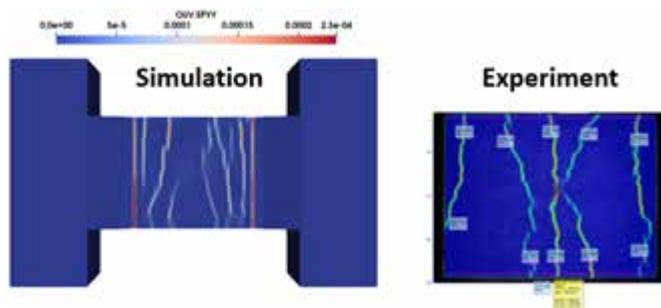
|                             |                                                                                                  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Omar NAJJAR                                                                                      |
| Date du début de la thèse : | 07/02/2022                                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-EXP/SES/LMAPS                                                                                |
| Réfèrent IRSN de la thèse : | Thomas HEITZ                                                                                     |
| Direction de la thèse :     | Frédéric RAGUENEAU/ENS Cachan & Benjamin RICHARD/IRSN                                            |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences - ED 579 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                             |

In response to the IRSN's aim to enhance understanding and modeling of containment degradation, particularly for the second and third barriers during severe accidents, this thesis investigates concrete cracks in French 1300 MWe reactor buildings using a novel simulation method. It aims to create a realistic three-dimensional cracking pattern through a two-step simulation approach, significantly improving leakage containment robustness. These results are leveraged in fluid mechanics simulations to assess leakage rates under severe accident conditions. The model is calibrated with experimental data from the COBRA program at the MACUMBA facility operated by IRSN. This involves testing cracking in two mock-ups under thermo-hygro-mechanical conditions indicative of severe accidents, focusing on evaluating leakage and aerosol retention.

The simulation steps are (1) computation of a continuous damage field with the finite element method (FEM); (2) re-analysis of the highly damaged area with a discrete element method (DEM) to compute physical crack features (Oliver-Leblond *et al.*, 2013); and (3) simulation of the leakage flow rate through the previously computed cracks by a CFD software.

(Matallah *et al.*, 2010) estimated the average crack opening per element via a post-processing based on fracture energy regularization. However, this method does not describe the crack geometry path and roughness. On the other hand, the discrete element method has shown its ability to represent concrete cracking characteristics explicitly (Oliver-Leblond, 2019) and will be used in this thesis.

A MATLAB post-processing tool has been successfully developed to obtain complex 3D cracking patterns within a concrete specimen, specifically a Brazilian splitting test specimen (Najjar *et al.*, 2023). These patterns geometries, derived from discrete element calculations, will be used as mesh for fluid mechanics dry air flow calculations and compared with existing experimental data. In our ongoing research, this approach will then be applied to a mock-up, COBRA, designed as a Representative Structural Volume (RSV) of the containment wall. In parallel, the first experimental mechanical results from the COBRA project are compared with the FEM simulations (see Figure). The results show a reasonably good agreement between the two regarding the crack opening field, considering the random variability of the concrete material.



**Mots clés :** damage, cracking, discrete element method, flow leakage measurement.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz  
dans les argilites

|                             |                                                                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Kayani GANESHALINGAM                                                                                         |
| Date du début de la thèse : | 21/11/2022                                                                                                   |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/SPDR/LETIS                                                                                           |
| Référent IRSN de la thèse : | Magdalena DYMITROWSKA                                                                                        |
| Direction de la thèse :     | Djimédo KONDO/Sorbonne Université                                                                            |
| École doctorale :           | Sorbonne Université - Sciences mécanique, acoustique,<br>électronique et robotique de Paris (SMAER) - ED 391 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                         |

En France, la loi de 2006 relative à la gestion des déchets radioactifs a confirmé l'option d'un stockage géologique profond dans une couche d'argilites du Callovo-Oxfordien. À la suite de la fermeture du stockage, une importante production d'hydrogène est attendue, pouvant ainsi altérer les propriétés de matériaux des barrières et donc impacter le transport des radionucléides. Au sein du SPDR, plusieurs projets expérimentaux et numériques ont été entrepris sur la migration de gaz dans le stockage, notamment dans le cadre du projet européen EURAD. Des études expérimentales montrent l'existence d'un couplage hydromécanique entre les écoulements eau-gaz dans les pores et la déformation du squelette solide des matériaux argileux. Cependant, en raison de l'impossibilité de valider les modèles à des échelles représentatives d'un stockage, les approches numériques multi-échelles sont devenues indispensables pour justifier ces modèles.

Ainsi, l'IRSN a développé une approche basée sur la méthode SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamics*) pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de gaz à l'échelle des pores et évaluer la pertinence de lois de comportement homogénéisées utilisées dans des simulations numériques macroscopiques. L'objectif de cette thèse est d'exploiter des maquettes numériques à partir des données d'imagerie 3D de diverses argilites pour effectuer des simulations de migration de gaz (drainage) dans une gamme des contraintes et de pressions la plus représentative possible pour les conditions expérimentales. Guidé par les comportements effectifs, un modèle hydromécanique continu sera élaboré pour décrire la migration de gaz à des échelles supérieures.

A partir des travaux de thèse déjà réalisés avec le code SPH (R. Chaves Deptulski), l'implémentation de l'interaction entre la phase solide et liquide (fracturation hydraulique) nécessite une validation. Pour cela, on étudie une fissure pressurisée dans un milieu élastique. Nous allons présenter l'analyse des sauts de déplacements et champs de contrainte au niveau de la fissure afin de les comparer aux résultats analytiques de la mécanique de rupture pour un cas de chargement en traction (chargement sur les bords de la plaque).

**Mots clés :** changement d'échelle, écoulements dilatants, smoothed particles hydrodynamics.

SUJET DE LA THÈSE

Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux

|                             |                                                                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Maiwenn HUMBEZI DESFEUX                                                             |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                                          |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/SPDR/LETIS                                                                  |
| Référent IRSN de la thèse : | Jean-Michel MATRAY                                                                  |
| Direction de la thèse :     | Manuel MARCOUX/Université Paul Sabatier - Toulouse                                  |
| École doctorale :           | Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie civil Procédés (MEGEP) - ED 468 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & FANC                                                                         |

La thèse s'inscrit dans le cadre des recherches de l'IRSN sur le stockage géologique des déchets radioactifs HA-MAVL, plus particulièrement sur les interactions entre les colis de stockage et la barrière géologique. L'étude vise à évaluer les processus générant le transfert des radionucléides en cas de fuite prématurée due à la corrosion des colis, lors du transitoire thermique lié à la présence de colis exothermiques de haute activité (HA).

Un essai *in situ* DIGIT (Diffusion sous Gradient Thermique - fig1) est mené au Laboratoire de Recherche Souterrain de Tournemire (LRST), pour mieux évaluer l'impact de la température sur le transport de l'eau et des solutés. Cette expérience consiste en un échange sous gradient de température entre l'eau porale et une solution enrichie en traceurs  $^2\text{H}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$  et  $\text{Br}^-$ , mimant la libération des radionucléides les plus mobiles ( $^3\text{H}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{129}\text{I}$  et  $^{79}\text{Se}$ ) issus de colis HA. Elle vise à qualifier l'importance relative des processus de transport mis en jeu notamment ceux entre les flux diffusifs sous gradient de concentration (2<sup>nd</sup>e loi de Fick) et de température (Effet Soret) mais aussi vis-à-vis de la convection. En parallèle, l'expérience doit permettre de définir précisément la distribution de la chaleur autour de la zone de test.

Ainsi, trois phases expérimentales de prélèvements et de mesures ont été mises en place. Une première phase de caractérisation initiale, menée dans le puits DIGIT et ses forages périphériques. Cette phase a permis d'obtenir lors de la première année de thèse les paramètres nécessaires aux calculs prédictifs, menés avec le logiciel Comsol notamment les coefficients de diffusifs effectifs ( $D_e$ ) et concentrations naturelles en traceurs dans l'eau porale. Une seconde phase au début de la deuxième année de thèse, après trois mois de mise en eau du puits sans température a permis d'obtenir un état initial en condition *in situ*. Les premiers résultats acquis sur cellules d'échange diffusif montrent une pénétration des traceurs plus importante que prévue, de quelques cm, par rapport aux résultats des calculs prédictifs. Ce résultat s'explique par des valeurs plus élevées attribuées aux effets d'échelle et à l'endommagement de la roche lors du creusement. Enfin, la troisième phase d'échantillonnage a eu lieu après cinq mois d'échange sous température, les résultats et les modélisations seront obtenus au cours de cette année.

Ces résultats permettront de préciser la contribution des différents processus de transport des traceurs analogues de radionucléides en cas de transfert thermique.

**Mots clés :** transfert thermique, thermodiffusion, diffusion, radionucléides, gaz, stockage géologique.

## SUJET DE LA THÈSE

## Coupled Modeling of Water-Gas Flow and Hydro-Mechanics in a Deep Geological Repository for Radioactive Waste

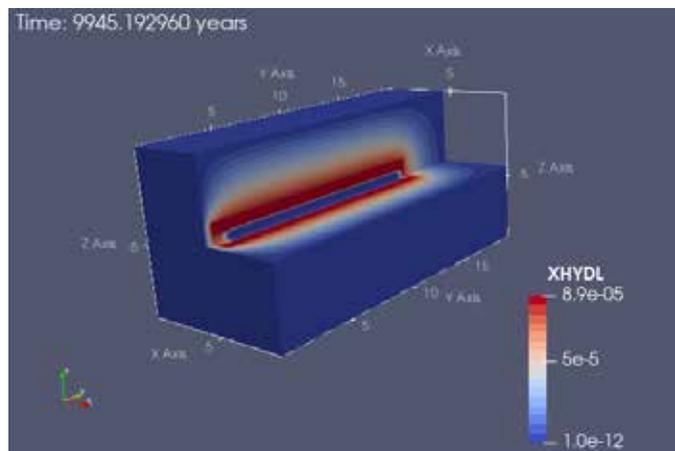
|                             |                                                                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Mohamed Haythem BAHLOULI                                                                  |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                                            |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SPDR / UEMIS                                                                    |
| Référent IRSN de la thèse : | Zakari SAADI                                                                              |
| Direction de la thèse :     | Rachid ABABOU / INP Toulouse                                                              |
| École doctorale :           | Université Toulouse 3 - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - ED 173 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                      |

This thesis focuses on the safety of a deep geological disposal facility for high-level (HL) and long-live intermediate-level (LL) radioactive waste. In host rocks such as Callovo-Oxfordian clay (COx, a candidate host rock for CIGEO disposal), as well as in engineered barriers (bentonite, concrete, etc.), gas transport phenomena (mainly hydrogen generated in the HLW cell, Figure below) occur in partially saturated porous media, leading to changes in the solid matrix (i.e., mechanical damage). The failure of current calculation codes to take account of facility-scale gas transport modelling, combining the effects of non-zero gas inlet pressure, hysteresis (Amri, 2021) and geomechanical deformation, has raised a number of questions about the reliability of facility safety calculations.

The aim of this thesis is to assess the uncertainties in gas migration models within the facility during its post-closure phase over periods of hundreds of thousands of years, by introducing the three aforementioned phenomena simultaneously. The methodology developed during this thesis work aims to introduce hydromechanical (HM) deformations into the modelling of interfaces between seals (engineered barriers) and host rock in a two-phase water-gas porous medium, in order to assess their influence on gas pressure and its impact on water flow.

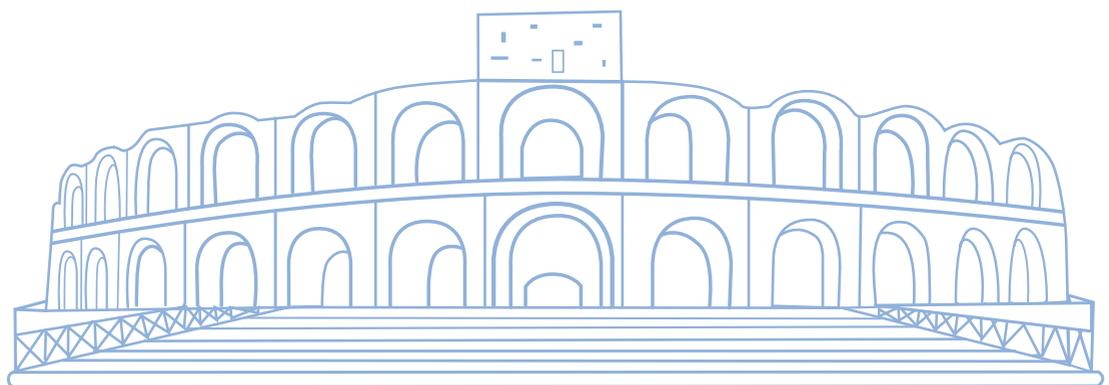
During this thesis, a hydromechanical deformation model based on a linear elastic law was implemented in COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2024) using the coefficient form PDE solver. In parallel, a 3D wastecell model has been developed and implemented in the iTOUGH2/EOS7R code (Finsterle, 2016) to assess the simultaneous impact of capillary gas entry pressure and the initial presence of air on hydrogen pressures and fluxes within the cell over a few thousand years. In addition, gas permeability models in two-phase water-gas and single-phase gas, with hydromechanics taken into account, are tested and validated on COMSOL, with the aim of developing a 3D hydromechanical model of the HLW cell.

**Mots clés :** water, gas flow, hydro, mechanics, deep geological repository, radioactive waste.



### Références :

- Amri A. (2021) : Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 213p.
- Finsterle S. (2016) iTOUGH2 User's Guide. LBNL-40040, Earth Sciences Division, LBNL, University of California, Berkeley, CA 94720.



> Jeudi 4 avril

14 h 30 - 15 h 30 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

> **SANTÉ ENVIRONNEMENT - Radiotoxicologie**

**Président: François PAQUET**

Responsable de l'axe programme santé environnement

**Théo FRÉCHARD** - Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale *in vivo* chez le rat.

**Margot CREVET** - Évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles domestiques (*Apis mellifera*), de la molécule à la population.

**Florian SALIOU** - Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de pathologies cardiovasculaires dans l'axe cœur-poumon.

## SUJET DE LA THÈSE

Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale  
*in vivo* chez le rat

|                             |                                                                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Théo FRÉCHARD                                                                             |
| Date du début de la thèse : | 01/10/2021                                                                                |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LRTOX                                                                      |
| Référent IRSN de la thèse : | Chrystelle IBANEZ                                                                         |
| Direction de la thèse :     | Dmitry KLOKOV/IRSN                                                                        |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay – Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                      |

Les expositions subies par un individu au cours de sa vie, y compris professionnelle, peuvent affecter le compartiment cérébral. Les rayonnements ionisants gamma faible-dose de l'exposome des travailleurs du nucléaire posent un questionnement scientifique du fait de la potentielle non-linéarité de leurs effets. Leur exposome professionnel comprend également l'inhalation d'aérosols particulaires. Nous avons choisi le tungstène pour son émergence en tant que contaminant issu du fonctionnement de réacteurs de fusion nucléaire. Ma thèse vise à caractériser si une irradiation gamma faible-dose associée à l'inhalation d'un aérosol particulaire de tungstène produit des effets différentiels sur les paramètres de toxicité cérébrale. Notre sujet est en lien avec les questions 1 et 3 de la stratégie scientifique de l'IRSN.

Des rats mâles adultes sont exposés par inhalation à des particules de tungstène (80mg.m<sup>-3</sup>, 30minutes) et/ou une irradiation gamma corps entier 50mGy (50mGy.min<sup>-1</sup>). Nos processus cibles de toxicité sont étudiés dans le bulbe olfactif (OB) et le cortex frontal (FC) à 24heures (24H) et 28jours (28J) post-exposition. Les difficultés rencontrées dans ce projet sont logistiques et associées aux contraintes du travail en boîte à gants. Ces contraintes nous obligent à étaler dans le temps les campagnes d'exposition ce qui induit un délai dans l'analyse des échantillons.

Les différences significatives sont observées majoritairement entre les groupes coexposés et les groupes contrôles et sont décrites dans ce paragraphe. Bien qu'aucune modulation de la mort cellulaire ou de la prolifération ne soit mesurée à 24H ou 28J dans OB ou FC, le FC présente une augmentation significative de la densité microgliale à 24H et une diminution à 28J. Parallèlement, une augmentation de la densité et de l'activation microgliale a été observée dans OB à 28J. Ces événements pourraient témoigner d'une migration microgliale de FC vers OB entre 24H et 28J. De plus, la densité d'un phénotype de souffrance neuronale diminue à 24H et augmente à 28J dans FC. On note également une augmentation de l'expression de gènes antioxydants dans FC à 28J suggérant une perturbation du microenvironnement cortical à ce temps post-exposition. Cela induirait une médiation dégradée des stress cellulaires et donc l'augmentation de neurones en souffrance.

En conclusion, nous observons une réponse hétérogène entre OB et FC. C'est la coexposition qui conduit le plus souvent à des différences significatives par rapport aux contrôles et aux stresseurs seuls. Les effets semblent perdurer ou parfois s'inverser jusqu'à 28J, posant ainsi la question de leur persistance au-delà de 28J.

**Mots clés :** neurotoxicité, coexposition, tungstène, faibles doses, rats.

## SUJET DE LA THÈSE

Évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles domestiques (*Apis mellifera*), de la molécule à la population

|                             |                                                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Margot CREVET                                                   |
| Date du début de la thèse : | 17/10/2022                                                      |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV / SERPEN / LECO                                         |
| Référent IRSN de la thèse : | Béatrice GAGNAIRE                                               |
| Direction de la thèse :     | Luc BELZUNCES / INRAE Avignon, UR Abeilles & Environnement      |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251 |
| Financement de la thèse :   | ANR BEERAD                                                      |

La contamination radioactive de l'environnement constitue un défi écologique majeur, souligné par les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima. Cette réalité souligne l'importance d'approfondir nos connaissances sur les impacts et les risques environnementaux liés à l'irradiation et à la contamination radioactive. Ma thèse se concentre sur l'étude des effets des rayonnements ionisants sur l'abeille domestique, *Apis mellifera*, un choix motivé par l'importance de cet insecte dans les écosystèmes et pour la société, couvrant des aspects économiques, écologiques et scientifiques. L'objectif est d'élargir les connaissances sur les conséquences des rayonnements ionisants à différents niveaux, de la molécule à la population, dans un domaine encore peu documenté. Ce travail répond à la question prioritaire de la Stratégie Scientifique de l'IRSN sur les effets d'une exposition à de faibles doses de rayonnement.

Ma thèse repose sur une approche double, combinant études de terrain et expérimentations en laboratoire. Sur le terrain, l'étude est conduite par le suivi de plusieurs colonies d'abeilles situées à proximité de la centrale nucléaire de Fukushima, dans des zones présentant un gradient de contamination radioactive allant de 0,15/0,30 µGy/h (témoins) à 20/30 µGy/h (fortement contaminés) en passant par 4/6 µGy/h (moyennement contaminés) au sol (suivi d'avril à octobre 2023 puis d'avril à août 2024). Au laboratoire, les expérimentations de 2022 et de 2023 ont permis d'étudier les effets combinés des rayonnements ionisants (14 µGy/h et 14 mGy/h) et de *Nosema ceranae*, un pathogène intestinal commun chez les abeilles afin d'étudier l'effet multistress, ainsi que l'impact des rayonnements sur la dynamique de colonies entières (10, 50, 500 et 5000 µGy/h). Les premiers résultats de l'étude sur l'effet des rayonnements ionisants couplés à *Nosema*, indiquent que *Nosema* réduit la consommation alimentaire et augmente la mortalité chez les abeilles. Toutefois, lorsque les abeilles sont simultanément irradiées et infectées, ces effets ne sont plus significatifs, suggérant une possible interaction antagoniste. Concernant les biomarqueurs, peu de différences physiologiques significatives ont été observées entre les abeilles témoins et celles infectées et/ou irradiées.

En 2024, les expérimentations se pencheront sur la reproduction et le développement larvaire, avec pour fil conducteur l'analyse des effets physiologiques des rayonnements. Cela inclura des dosages enzymatiques pour évaluer la réponse au stress oxydatif, l'intégrité métabolique, les réponses immunitaires et l'activité neuronale. L'objectif est de comparer les résultats obtenus sur le terrain et en laboratoire, afin d'évaluer dans quelle mesure les expérimentations en laboratoire peuvent prédire les observations faites en conditions naturelles.

**Mots clés :** *Apis mellifera*, rayonnements ionisants, biomarqueurs, approche combinée terrain, laboratoire.

## SUJET DE LA THÈSE

Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma  
sur le développement de pathologies cardiovasculaires dans l'axe cœur-poumon

|                             |                                                                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Florian SALIOU                                                                            |
| Date du début de la thèse : | 01 / 10 / 2021                                                                            |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN / SESANE / LRTOX                                                                  |
| Référent IRSN de la thèse : | Virginie MONCEAU                                                                          |
| Direction de la thèse :     | Éric MOREL / université Paris Saclay                                                      |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay – Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                      |

De nos jours les conséquences des doses faibles à modérées (<0,5Gy) de rayonnements ionisants sur le système cardiovasculaire restent débattues avec seulement quelques études épidémiologiques montrant pour des doses supérieures ou égales à 0,5Gy des insuffisances cardiaques, des arythmies ainsi qu'un remodelage vasculaire cardiaque et pulmonaire. Les incertitudes principalement dû à un manque de données biologiques sur les effets des faibles doses (FD) concernent les populations exposées dans les zones irradiées ainsi que les travailleurs du nucléaire. Cette étude intègre la question 1 de la stratégie scientifique de l'IRSN qui vise à étudier les effets d'une exposition aux FD. Notre hypothèse d'étude est qu'une exposition à une dose inférieure à 0,5Gy de rayonnements ionisants gamma induirait également le développement de pathologies cardiovasculaires via un remodelage tissulaire cardiaque et pulmonaire à long terme.

Nous avons irradié des souris mâles C57BL/6J à des doses uniques de rayons gamma (Césium 137) allant de 0,25 à 2Gy avec l'étude à 3 mois post-exposition de la fonction cardiaque (EchoDoppler), du remodelage tissulaire (coloration rouge Sirius) ainsi que des voies de signalisations (Western-blot). Les paramètres vasculaires pulmonaires ont été déterminés par l'évaluation de la mesure de la pression artérielle pulmonaire via le ventricule droit et du pourcentage de muscularisation des vaisseaux supérieurs à 100µm (Immunofluorescence).

Les résultats de l'EchoDoppler montrent une diminution de la performance cardiaque par une réduction de la fraction d'éjection pour toutes les doses d'expositions (diminution de 10% ;  $p < 0,05$ ), une diminution de la contractilité cardiaque (diminution de 5% à 0,25 et 0,5Gy ;  $p < 0,05$ ) ainsi qu'une augmentation à la susceptibilité aux fibrillations atriales (pour les irradiées ;  $p < 0,05$ ). Au niveau tissulaire, nous observons une fibrose interstitielle radio-induite (0,5 et 2Gy ;  $p < 0,001$ ). Les résultats des Western-Blot montrent une diminution de l'expression de protéines impliquées dans la conduction et le système nerveux cardiaque (Connexines 43 et Tyrosine Hydroxylase à 0,25Gy ;  $p < 0,001$ ) et une augmentation de protéines impliquées dans la propagation de l'influx nerveux (Synapsine pour les irradiées ;  $p < 0,01$ ) ; ces modifications d'expression pourraient expliquer la diminution de la performance cardiaque. Concernant les paramètres pulmonaires, l'augmentation de la pression pulmonaire (pour les irradiées ;  $p < 0,05$ ) semble corrélée à l'augmentation de la muscularisation vasculaire (0,5 et 2Gy ;  $p < 0,05$ ). En conclusion, cette étude montre pour la première fois des altérations fonctionnelles et moléculaires (dès 0,25Gy) à l'origine des pathologies cardiovasculaires (tels que les arythmies).

**Mots clés :** cœur, faibles doses, vasculaires, poumons, rayonnements ionisants.

> Jeudi 4 avril

16 h 00 - 17 h 25 Salle Marie Mauron

#### SESSION PARALLÈLE

> **FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Pathologie et surveillance du béton**

**Présidente: Fabienne RIBEIRO**

Docteure en chimie physique

**Lucie GOMEZ** - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradation des granulats au cours d'une réaction alcali-granulats.

**Rita TABCHOURY** - Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons.

**Rémy HOARAU BELKHIRI** - Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme.

**Klayne DOS SANTOS SILVA** - Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradation des granulats au cours d'une réaction alcali-granulats

|                             |                                                                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Lucie GOMEZ                                                                         |
| Date du début de la thèse : | 04/10/2021                                                                          |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEMIA/LSMA                                                                  |
| Référent IRSN de la thèse : | Frédéric PERALES                                                                    |
| Direction de la thèse :     | Stéphane MULTON/INSA Toulouse & Benoit FOURNIER/Université de Laval                 |
| École doctorale :           | Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - ED 468 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & Hydro-Quebec                                                                 |

Le sujet de thèse s'inscrit dans la question 4 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN : Comment évaluer de manière réaliste l'impact sur la sûreté des évolutions des caractéristiques des installations sur toute leur durée de vie ?

L'objectif est l'évaluation, par **une approche expérimentale/numérique**, de la dégradation (expansion, fissuration) des matériaux cimentaires, telles que l'enveloppe de confinement en béton des réacteurs nucléaires, due à la conséquence d'une **Réaction Alcali-Granulats (RAG)**. Cette réaction se déroule en 4 étapes : transport d'ions, dissolution de la silice réactive au contact de la solution basique du béton, précipitation de produits de réaction à partir de la silice aqueuse en solution entraînant un gonflement pouvant conduire à la fissuration de la pâte et des granulats.

Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu, un **modèle numérique de transport réactif** (prenant en compte la diffusion et les réactions chimiques) a été mis en place. Le modèle a permis de retrouver les observations expérimentales (gels se formant à l'interface et à cœur du granulat) et une étude paramétrique a notamment mis en évidence l'importance de la dissolution de la silice dans la réaction.

Une campagne expérimentale, ayant pour objectif d'identifier quantitativement les paramètres nécessaires au modèle, est en cours. La cinétique de la réaction dépendant principalement de la réactivité des granulats, 4 granulats de réactivité connue sont étudiés (3 réactifs et 1 non-réactif) afin d'évaluer la différence de comportement face à la réaction. La campagne repose sur :

- des **essais chimiques** : diffusion (coefficients de diffusion et porosité) et solubilité (coefficient cinétique de dissolution et quantité totale de silice réactive disponible),
- des **essais mécaniques** : résistance en compression et en traction, essais d'expansion sur mortier et béton, suivi de l'observation de plaques polies de béton (caractérisation qualitative l'endommagement et la fissuration).

Les résultats de la campagne expérimentale permettent d'observer les différences de comportement des granulats lors de la réaction. En effet, selon la structure et quantité de silice réactive initiale contenue dans chaque granulat ainsi que l'état de leurs réseaux poreux, la cinétique de réaction est différente, menant à des dommages plus ou moins sévères.

Enfin, l'évolution vers la prise en compte de la fissuration est en cours. Des simulations chimio-mécaniques, couplant le modèle de transport réactif et le comportement mécanique, seront effectuées afin d'évaluer l'impact de la fissuration sur l'évolution de la réaction et ses conséquences.

**Mots clés** : réaction alcali silice, granulat réactif, transport réactif.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons

|                                                                                                       |                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Doctorante :                                                                                          | Rita TABCHOURY                |
| Date du début de la thèse :                                                                           | 20/09/2021                    |
| Laboratoire IRSN :                                                                                    | PSN-EXP/SES/LMAPS             |
| Référent IRSN de la thèse :                                                                           | Georges NAHAS                 |
| Direction de la thèse :                                                                               | Stéphane MULTON/INSA Toulouse |
| École doctorale : Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - Ed 468 |                               |
| Financement de la thèse :                                                                             | IRSN & projet H2020 ACES      |

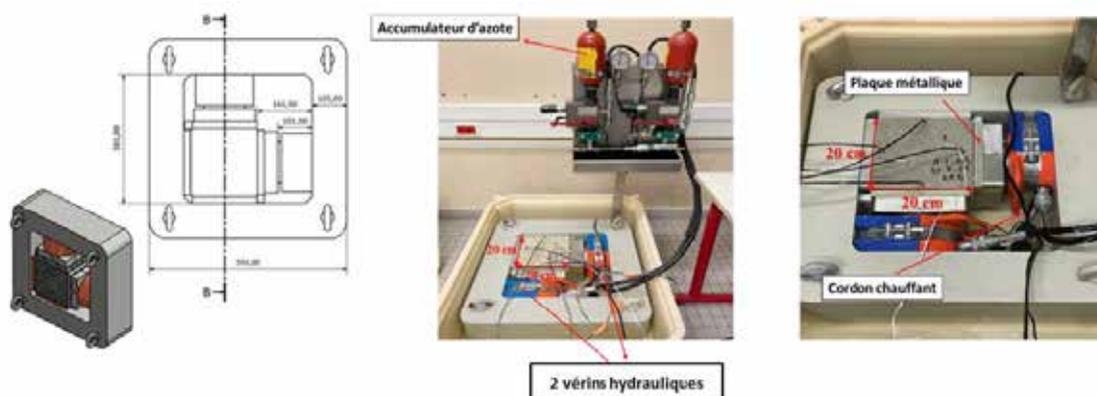
De nombreux ouvrages en béton pourraient être atteints dans le temps et sous certaines conditions, par les réactions de gonflement internes (RGI) avec des conséquences potentielles sur leurs exigences de comportement. Pour être capable de modéliser l'évolution de leur comportement, des recherches doivent être menées pour étudier leurs couplages avec des sollicitations mécaniques présentes dans la structure de l'ouvrage. Il convient de préciser que le fluage du béton provoque des pertes de précontraintes dans les câbles pouvant entraîner une décompression dans le plan de l'enceinte si elles s'avéraient trop élevées. L'enjeu de sûreté dans ce travail de recherche repose sur les fissures provoquées par les RGI. Ainsi, l'exigence principale à laquelle nous nous intéressons est le maintien de l'intégrité structurelle du béton de l'enceinte pour garantir le confinement des matières radioactives en situations accidentelles.

Dans le cadre du projet européen ACES/H2020 et du consortium CONCRETE, ce travail s'appuie sur un programme expérimental complet dans des conditions représentatives de celles des enceintes pour fournir des données représentatives de la situation opérationnelle afin de mieux appréhender les phénomènes et d'améliorer les modèles de simulations.

L'objectif de notre étude est d'évaluer le fluage en compression biaxiale, avec et sans couplage avec des RGIs, afin de comprendre les mécanismes, et de tester, voire d'améliorer les modèles. Un bâti original de fluage biaxial a été conçu pour tester des dalles en béton de 20x20x15 cm<sup>3</sup>. Leurs déformations sont mesurées suivant les trois directions grâce à des capteurs à fibre optique noyés, résistants aux conditions sévères nécessaires pour accélérer les RGIs. De multiples configurations de fluage, de l'ordre de vingt-six, ont été testées, en compressions uniaxiale et biaxiale, dans des conditions symétriques et asymétriques, avec des contraintes de 8,5 MPa et 12 MPa, représentatives de celles des deux directions de précontrainte des enceintes.

L'analyse des résultats des essais réalisés montre que les déformations de fluage dépendent fortement des conditions de chargement. La distribution asymétrique des contraintes révèle l'importance de l'effet du coefficient de Poisson entre les deux directions. Dans le cas biaxial, les déformations de fluage dans la direction moins chargée (8,5 MPa) et plus chargée (12 MPa) sont respectivement plus faibles et plus fortes que celles mesurées dans les configurations uniaxiales. Les essais avec la présence de RGIs étant toujours en cours, les résultats disponibles de fluage biaxial sans RGI constituent une base de données originales et rares permettant d'évaluer les modèles numériques.

**Mots clés :** fluage biaxial, réactions de gonflement interne, bâti de fluage biaxial, fibre optique.



SUJET DE LA THÈSE

Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme

|                             |                                                                                                     |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Rémy HOARAU BELKHIRI                                                                                |
| Date du début de la thèse : | 02/11/2021                                                                                          |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-ENV/SPDR/LETIS                                                                                  |
| Référent IRSN de la thèse : | Mejdi NEJI                                                                                          |
| Direction de la thèse :     | Stéphane POYET/CEA                                                                                  |
| École doctorale :           | Université Paris Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques,<br>Matériaux et Géosciences - ED 579 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                |

Les matériaux cimentaires sont communément utilisés comme matrice de conditionnement de déchets radioactifs de faible et moyenne activité ; ce processus implique que la matrice d'immobilisation soit exposée aux rayonnements ionisants pendant la prise du liant hydraulique. Actuellement, les quelques données disponibles dans la littérature ne permettent pas de statuer sur un potentiel effet de l'irradiation sur l'hydratation de la matrice cimentaire. L'IRSN s'intéresse par conséquent à l'évaluation de l'impact d'un tel phénomène sur les propriétés chémo-mécaniques du matériau durci.

Dans cette étude, différentes pâtes de ciment ont été considérées : silicate tricalcique (C3S), ciment Portland (CEM I) et ciments de Haut-Fourneau (CEM III/A et CEM III/C). Ces matériaux ont été soumis à un rayonnement gamma pendant leur hydratation/prise, à un débit de dose de 2,5 kGy/h pour différentes durée et température d'exposition. La minéralogie, les propriétés mécaniques et la microstructure de chaque matériau ont ensuite été déterminées et systématiquement comparées à deux pâtes témoins analogues, hydratées respectivement à des températures similaires. La minéralogie a été étudiée par RMN, ATG et analyses DRX ; les propriétés mécaniques ont été mesurées par nanoindentation, tandis que la porosimétrie Hg et l'adsorption d'azote ont été utilisés pour les analyses microstructurales.

Les résultats expérimentaux ne montrent pas d'impact significatif de l'irradiation sur les propriétés de ces matériaux ; exception faite d'une élévation de la température, induisant une augmentation de la cinétique d'hydratation. Néanmoins, des analyses RMN 29Si mettent en évidence une diminution de la quantité d'eau liée sur la phase majoritaire, le silicate de calcium hydraté (C-S-H), sur les pâtes de C3S irradiés. Enfin, les mesures portant sur la microstructure des pâtes irradiées de C3S, CEM I et CEM III/A révèlent une diminution de la porosité capillaire accessible, suggérant une quantité moindre d'eau libre pendant la prise des matériaux. Ce phénomène n'a pas été observé sur les échantillons de CEM III/C irradiés.

La phénoménologie responsable n'est pas encore clairement définie : une contribution accrue de la radiolyse sur ce système riche en eau pourrait être mise en cause, un effet de dissolution/précipitation ayant lieu pendant la prise pourrait être également une hypothèse envisageable. Des investigations visant à confirmer ces résultats sont en cours, sur des matériaux similaires ayant déjà été hydratés avant irradiation.

**Mots clés :** ciment, hydratation, irradiation, déchets radioactifs.

## SUJET DE LA THÈSE

**Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE**

|                             |                                                                                                                |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Klayne DOS SANTOS SILVA                                                                                        |
| Date du début de la thèse : | 20/10/2021                                                                                                     |
| Laboratoire IRSN :          | PSN-RES/SEREX/L2EC                                                                                             |
| Référent IRSN de la thèse : | Benoit DURVILLE                                                                                                |
| Direction de la thèse :     | Vincent GARNIER/LMA                                                                                            |
| École doctorale :           | Aix Marseille Université - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353 |
| Financement de la thèse :   | IRSN, PACA & MISTRAS Group SAS                                                                                 |

---

L'un des enjeux de la stratégie scientifique de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est de trouver les moyens d'évaluer de manière réaliste l'impact sur la sûreté de l'évolution des caractéristiques des installations tout au long de leur vie utile. Dans le contexte des centrales nucléaires, le béton de l'enceinte constitue la structure principale, jouant un rôle crucial dans le confinement de la matière radioactive en cas d'accident. Cependant, des pathologies telles que les réactions de gonflement interne (RGI) peuvent compromettre la durabilité du béton.

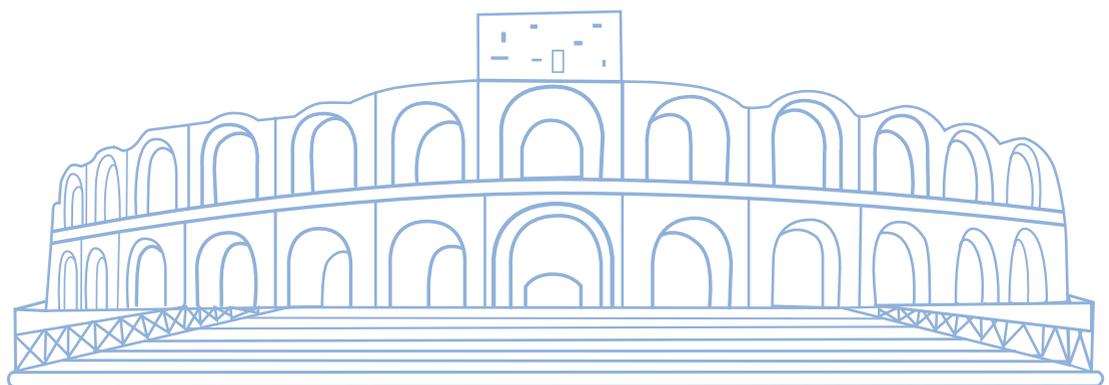
Les réactions de gonflement interne (RGI) sont des pathologies qui peuvent conduire à l'expansion et à la fissuration du béton. Ces facteurs dégradent la durabilité des structures, d'où la nécessité de proposer des systèmes de surveillance de l'état des structures pour détecter l'apparition de ces pathologies avant apparition de dégradations notables visibles.

Tenant compte de l'extension de durée de vie des centrales, les propriétés du béton doivent être surveillées pour détecter la formation de fissure, sans avoir recours à des carottages destructifs, d'où la proposition d'une méthode d'Examen Non Destructif (END) adaptée à des structures épaisses.

L'objectif de ce travail est de transposer une méthode d'END ultrasonore dans le domaine non-linéaire du laboratoire (thèse F.OUVRIER-BUFFET 2016-2019) à la pleine échelle (bloc de béton de 1 m d'épaisseur sur programme ODOBA). La technique consiste à analyser l'interaction entre une onde sonde (mesure) et une onde pompe (solicitation) colinéaires. La non-linéarité variant en fonction des contacts imparfaits, elle est normalement sensible à l'apparition de fissuration et son évolution peut être surveillée en fonction du vieillissement.

Après validation sur une maquette à moyenne échelle de la méthode et du matériel développé spécifiquement par le partenaire industriel Mistras Group, les premiers essais à pleine échelle ont été menés pour établir l'état initial du béton (état sec, puis état hydraté à 20°C) avant accélération (saturation à 40°C) de la pathologie RAG. Ces essais permettront de faire émerger les limitations de la méthode et devront conduire à comparer différentes zones du bloc susceptibles d'évoluer en fonction du temps. Des mesures internes par extensométrie et fibre optique sont en place pour lier les évolutions acoustiques à l'état du matériau.

**Mots clés :** béton, réactions de gonflement interne, acoustique non linéaire, ultrasons.



> Jeudi 4 avril

16 h 00 - 16 h 50 Salle Manadiers

#### SESSION PARALLÈLE

> **MÉDECINE - Expositions médicales et effets des rayonnements**

**Président: Guillaume PHAN**

Pharmacien et docteur en physico-chimie et pharmacotechnie

**Alexandre PIGNARD** - Optimisation de la radiothérapie interne vectorisée avec le  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA pour le cancer métastatique de la prostate résistant à la castration : quelle méthode pour une estimation personnalisée de la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque ?

**Sabine LAM** - Étude de la complexation des ions lanthanides avec les acides hydroxamiques et picoliniques pour des applications en médecine nucléaire.

**Mélessandre GOMOT** - Irradiations médicales à faible dose et carcinogénèse du côlon.

## SUJET DE LA THÈSE

Optimisation de la radiothérapie interne vectorisée avec le  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA pour le cancer métastatique de la prostate résistant à la castration : quelle méthode pour une estimation personnalisée de la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque ?

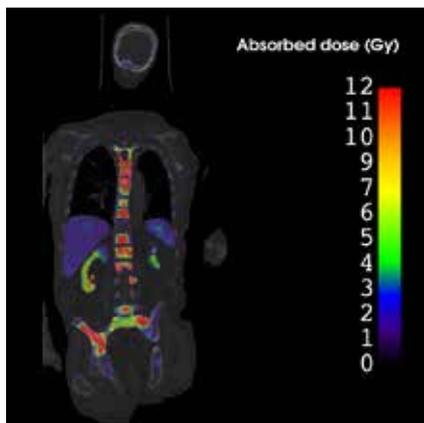
|                             |                                                                                                                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | Alexandre PIGNARD                                                                                                                     |
| Date du début de la thèse : | 03/10/2022                                                                                                                            |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SDOS/LEDI                                                                                                                     |
| Référent IRSN de la thèse : | Stéphanie LAMART                                                                                                                      |
| Direction de la thèse :     | Didier FRANCK/IRSN                                                                                                                    |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                                                                                  |

La radiothérapie interne vectorisée consiste à cibler et traiter un cancer ou une affection bénigne à l'aide d'un médicament radiopharmaceutique (MRP), tel que le  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA développé pour le traitement des cancers métastatiques de la prostate résistants à la castration. La distribution spatio-temporelle du MRP dans l'organisme dépend du patient et détermine la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque (OAR). Pourtant, la même activité est administrée à tous les patients et les traitements ainsi réalisés peuvent conduire à une administration qui ne serait pas adaptée : un surdosage entraînant des toxicités aux OAR (reins, glandes salivaires et moelle rouge), ou un sous-dosage pouvant rendre le traitement moins efficace.

L'objectif de la thèse est donc d'établir une méthode personnalisée d'évaluation de la dose absorbée aux lésions et aux OAR pour un traitement au  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA, et de prévenir les effets secondaires de cette thérapie dans les tissus sains.

Pour se faire, des outils de calcul personnalisé de la dose absorbée seront élaborés à partir des données cliniques de patients collectées auprès de différents centres partenaires de l'étude. Puis, des corrélations seront recherchées entre les résultats dosimétriques et les effets biologiques observés. Enfin, un réseau bayésien sera développé afin d'estimer les incertitudes sur les résultats et pourra notamment permettre de proposer des voies d'optimisation du protocole dosimétrique pour la routine clinique.

Jusqu'à présent, un protocole de calcul personnalisé de la dose absorbée a été établi à partir de l'utilisation d'images anatomiques du patient et de distribution du MRP à plusieurs temps après administration. Il a permis notamment la prise en compte des lésions osseuses dans le calcul de dose absorbée à la moelle rouge. Les résultats dosimétriques obtenus pour un premier patient de Gustave



Roussy sont conformes aux ordres de grandeur trouvés dans la littérature. L'une des difficultés majeures réside dans la segmentation des lésions osseuses invisibles sur le scanner, et pour laquelle une méthode innovante basée sur l'image de distribution du MRP a été développée. Par ailleurs, la structure d'un réseau bayésien adapté au calcul d'incertitude sur la dose absorbée pour le protocole clinique de l'étude a également été définie.

**Mots clés :** radiothérapie interne vectorisée, dosimétrie personnalisée,  $^{177}\text{Lu}$ , PSMA, cancer métastatique de la prostate, radioprotection.

*Figure. Fusion entre une image anatomique en coupe coronale et la carte de dose absorbée après une cure de  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA pour un patient.*

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude de la complexation des ions lanthanides avec les acides hydroxamiques et picoliniques pour des applications en médecine nucléaire

|                             |                                                                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Sabine LAM                                                                                                                           |
| Date du début de la thèse : | 01 / 12 / 2022                                                                                                                       |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN / SESANE / LRSI                                                                                                              |
| Référent IRSN de la thèse : | Guillaume PHAN                                                                                                                       |
| Direction de la thèse :     | Vladimir SLADKOV / CNRS                                                                                                              |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENICS) - ED 576 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & IJCLab (CNRS)                                                                                                                 |

La Théranostique est une nouvelle stratégie médicale qui associe le diagnostic et la thérapie dans le cadre d'une approche unifiée, en sélectionnant les patients les plus aptes à répondre au traitement donné. Cette approche reposant sur l'utilisation d'une nouvelle génération de médicaments radiopharmaceutiques émettant des rayonnements ionisants, sera amenée à prendre une place importante en médecine nucléaire. Afin d'appréhender au mieux l'arrivée sur le marché de ces médicaments, leurs impact en termes de radioprotection et conformément à la question N°5 de la stratégie scientifique IRSN, des études sont nécessaires afin de mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation de ces rayonnements ionisants. Nous nous intéressons ici au Terbium, candidat idéal pour la Théranostique, car il possède 4 isotopes intéressants pour la radiothérapie interne et l'imagerie.

La première étape de la thèse est de caractériser les propriétés des complexes des ions lanthanides (dont le Tb(III)) avec différents ligands afin de sélectionner les plus adaptés pour la vectorisation du Tb(III) en termes de stabilité. On utilise au moins 2 méthodes analytiques pour déterminer les constantes thermodynamiques : le partage d'un soluté entre deux phases non-miscibles avec détection ICP-MS (LRSI) et l'électrophorèse capillaire d'affinité (IJCLab). Les calculs quantique (DFT) seront également effectués pour obtenir les données structurales des complexes. La seconde étape sera dédiée aux études de la stabilité des complexes du Tb(III) avec les ligands sélectionnés dans différents milieux *in vitro* (LRSI). Enfin une étude de la cytotoxicité *in vitro* permettra d'évaluer les risques chimiques et de vérifier l'innocuité du complexe Terbium-ligand avec l'élément naturel.

Nous avons commencé par travailler avec la méthode de partage d'analyte entre 2 phases non miscibles. Dans un premier temps nous avons cherché à optimiser les conditions pour les études thermodynamiques (choix du système biphasique, compositions des phases, les volumes des phases, concentration d'analyte...) et pour le dosage du Tb(III) par ICP-MS. Pour la phase organique nous avons testé 3 différents solvants et pour la phase aqueuse nous avons décidé de travailler avec un milieu non-complexant à pH acide et à force ionique fixe. Pour la suite des travaux, parmi trois phases organiques étudiées nous nous sommes focalisés sur celle qui nous semble la plus appropriée pour les études de la complexation et qui n'induit pas d'augmentation du pH dans la phase aqueuse. Un partage du Tb(III) entre 2 phases est obtenu avec des données reproductibles.

**Mots clés :** complexation, terbium, théranostique.

## SUJET DE LA THÈSE

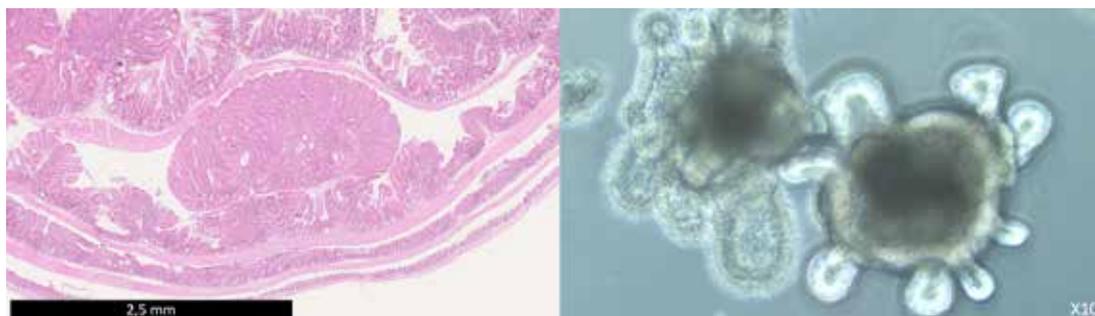
## Irradiations médicales à faible dose et carcinogénèse du côlon

|                             |                                                                                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Mélessandre GOMOT                                                              |
| Date du début de la thèse : | 10/10/2022                                                                     |
| Laboratoire IRSN :          | PSE-SAN/SESANE/LRTOX                                                           |
| Référent IRSN de la thèse : | Guillaume VARES                                                                |
| Direction de la thèse :     | Guillaume VARES/IRSN                                                           |
| École doctorale :           | Université Paris-Saclay – Structure et dynamique des systèmes vivants - ED 577 |
| Financement de la thèse :   | IRSN                                                                           |

L'évaluation des risques de cancers liés à l'exposition aux faibles doses de radiations ionisantes constitue un enjeu majeur de santé publique. Chaque jour, 500 000 patients bénéficient d'examens radiologiques par tomographie assistée par ordinateur (CT-scan), entraînant des expositions à de faibles doses de rayons X pouvant atteindre 100 mSv. La relation dose/risque est bien démontrée pour le cancer du côlon, mais les effets résultant d'expositions diagnostiques abdominales à faible dose sont encore mal caractérisés. Ce projet vise à améliorer l'évaluation des risques des expositions médicales sur le développement de cancer colorectal en participant au développement d'un modèle intégré de réponse cellulaire et moléculaire aux faibles doses de radiations. Il s'inscrit dans la thématique de radioprotection de l'IRSN et plus particulièrement les effets d'une exposition aux faibles doses de radiation (question 1). Afin de caractériser les effets de ces expositions, nous utilisons un modèle inductible murin de cancer du côlon (KPC:ACP) permettant l'inactivation d'Apc et/ou l'activation de Kras. Après administration de tamoxifène les animaux développent des tumeurs intestinales similaires (histologiquement et moléculairement) aux tumeurs colorectales humaines. Après caractérisation de la cinétique de développement des tumeurs, les effets histopathologiques d'expositions à 25mGy, 250mGy et 2Gy seront étudiés. Des organoïdes de côlon ont été établis en parallèle à partir de souris KPC:APC afin de créer le modèle *in vitro* équivalent. Irradié dans les mêmes conditions ils permettront l'étude mécanistique (transcriptomique, profilage ribosomique, analyse de méthylation de l'ARN).

De manière attendue l'étude pilote a mis en évidence une cinétique de développement tumoral dépendante du génotype et de la dose d'inducteur. Selon la dose, des lésions dysplasiques à tendance adénomateuses ou des adénomes sont observées 8 semaines après induction des mutations Apc et Kras. Tandis qu'en présence de la mutation Apc seule, l'atteinte est plus légère avec le développement de zones d'hyperplasie et de dysplasie de bas grade en 8 à 12 semaines. En parallèle les organoïdes KPC:APC établis présentent les caractéristiques morphologiques et cellulaires typiques des organoïdes de côlon. La caractérisation des effets cellulaires et moléculaires en réponse à l'administration de tamoxifène dans des organoïdes irradiés et non irradiés est en cours de réalisation.

**Mots clés :** carcinogénèse du côlon, faible dose de radiation, KPC : APC, organoïdes.



# SESSION POSTERS

Salle Bouvine

Mercredi 3 avril 13h15 - 14h30

Jeudi 4 avril 13h15 - 14h30

Doctorants de 1<sup>re</sup> 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 <sup>36</sup>Cl 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                                                    |
| Référent 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  $^{36}\text{Cl}$  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  $^{36}$  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  $^{36}\text{Cl}$ , 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  $^{36}\text{Cl}$  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  $^{36}\text{Cl}$  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  $^{36}\text{Cl}$  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<br>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  $\mu\text{m}$  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 Jésugnon 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 :<br>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<sup>er</sup> 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

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

*Restitution théorique du chantier  
de mise en œuvre du béton romain<sup>[1]</sup>*

## 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

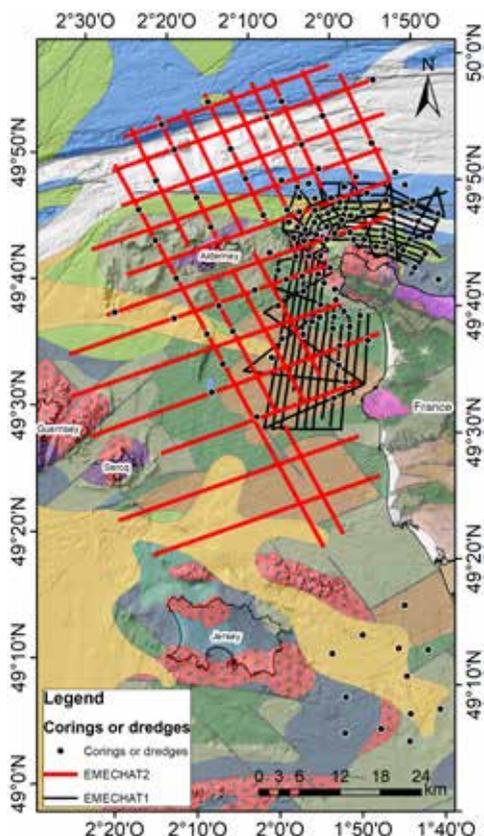
|                             |                                                                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorante :                | Juliette THOMAS                                                                           |
| 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<br>& 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<sup>re</sup> 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

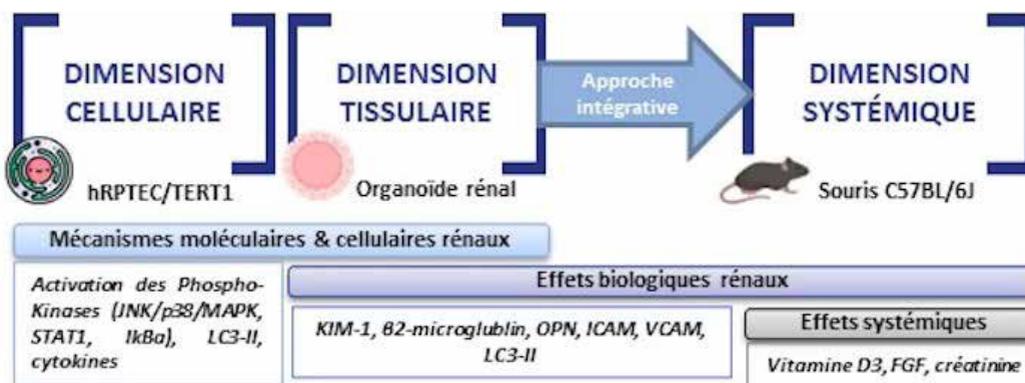
Doctorante : Clémence FINET  
 Date du début de la thèse : 12/10/2023  
 Laboratoire IRSN : PSE-SAN/SESANE/LRSI  
 Référent IRSN de la thèse : Yann GUEGUEN  
 Direction de la thèse : Yann GUEGUEN/IRSN & Sabine SANTUCCI/Université de Nice  
 École doctorale : Université Paris-Saclay - Innovation thérapeutique: 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 stressors 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 transparençation 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 stressor 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.

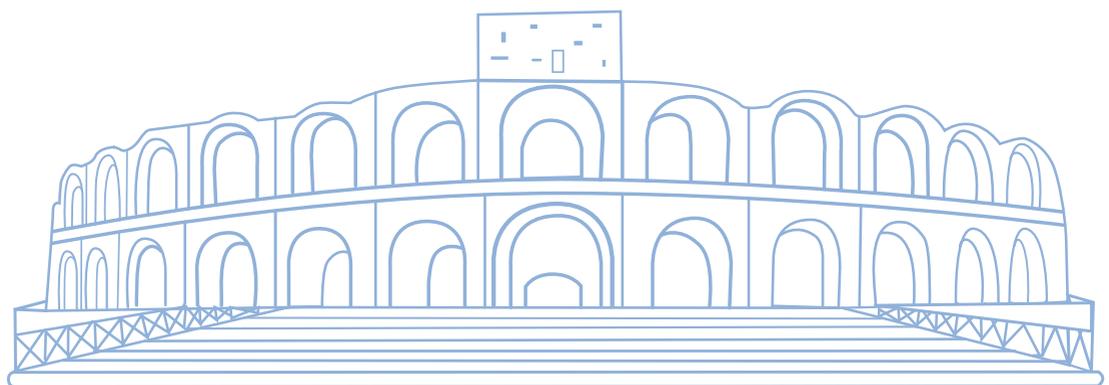
L'objet de cette thèse est d'intégrer, année après année, l'ensemble des expositions aux RIs auxquelles un individu est soumis depuis sa naissance et d'en caractériser les effets sur le développement de pathologies chroniques, en s'appuyant sur les données de la cohorte CONSTANCES, en tenant compte de 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<sup>re</sup> 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,<br>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)**

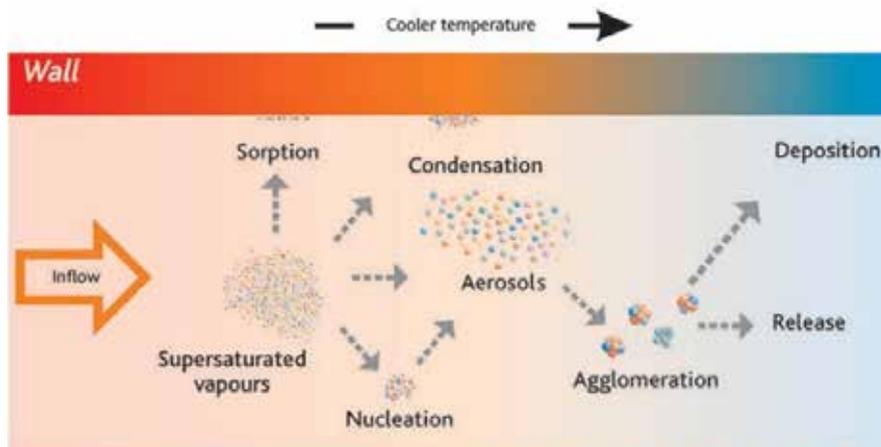
|                             |                                                                                                    |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doctorant :                 | João 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

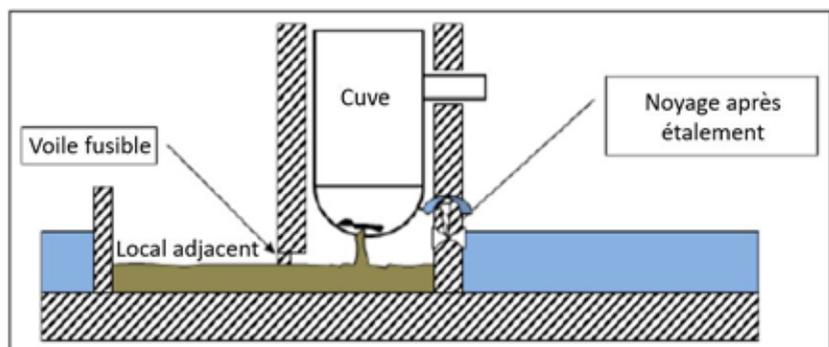
Étude numérique du comportement thermomécanique de la croûte supérieure  
du bain de corium en situation d'ICB renoyé : mieux évaluer les flux de chaleur vers l'eau  
et ceux vers le béton

|                             |                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 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<br>(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<sup>[1]</sup>, 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<br>& Thierry LOISEAU/Université de Lille               |
| École doctorale :           | Université de Lille - Sciences de la Matière, du Rayonnement<br>et de l'Environnement (SMRE) - ED 104 |
| Financement de la thèse :   | IRSN & ORANO                                                                                          |

Lors du retraitement du combustible usagé (procédé PUREX<sup>[1]</sup>, 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)<sup>[2]</sup>.

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<sup>[3]</sup>) utilisés pour quantifier les rejets de Ru dans le contexte des installations LUDD<sup>[4]</sup> et implantés dans le code ASTEC<sup>[5]</sup> (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 :<br>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:

- a. Exploring New Energy Ranges: The thesis suggests focusing on under-researched energy ranges below 1 MeV to broaden the understanding of irradiation damage.
- b. 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.
- c. 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.
- d. 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  $^{239}\text{Pu}$ ), 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'empoussièrement, 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.

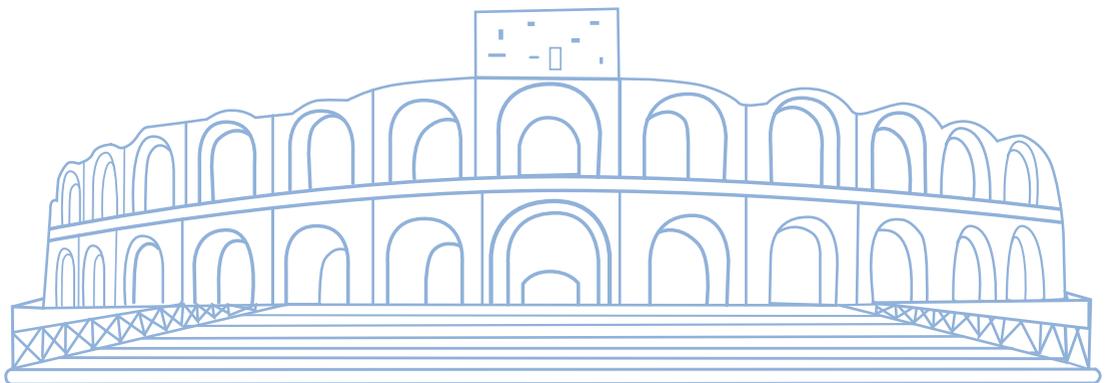
La thèse s'inscrit dans ce cadre et cherche à comprendre comment les dispositifs et les instruments de gestion des compétences sont utilisés et soutiennent ou non le développement et la transmission des compétences des acteurs de terrain. L'intérêt est de partir de l'activité des acteurs à travers leur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

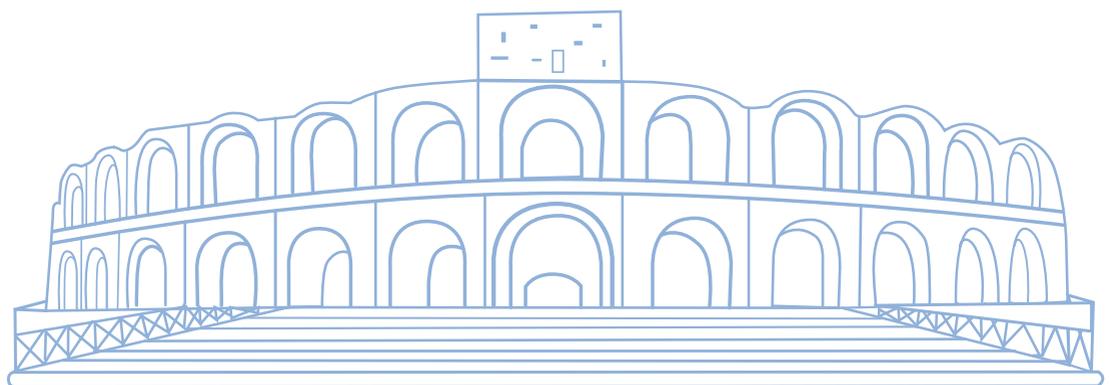
Un accord de coopération avec ORANO permet de travailler sur les questions du développement, de l'acquisition et de la transmission de compétences spécifiques, dites « rares » (c'est-à-dire des compétences détenues par peu de personnes au sein d'un métier, qui sont acquises sur un temps long) relative 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.

> SOIRÉES,  
VISITE,  
& AUTRES  
INFORMATIONS





> LA SOIRÉE CONFÉRENCE  
MARDI 2 AVRIL  
20 h 45 Salle Marie Mauron

## Valoriser son expérience doctorale et élaborer son projet professionnel

par Vincent Mignotte, Directeur de l'Association Bernard Grégory

Se projeter après la thèse... pas évident lorsque l'on se trouve au milieu du gué, tiraillé.e entre l'analyse de ses dernières expérimentations de thèse et la rédaction de son mémoire. Pourtant, à ne pas s'y préparer, le risque est de ne pas être excellent au moment où, le doctorat en poche, l'emploi, quel qu'il soit, se présente.

Son projet professionnel, il faut commencer à y réfléchir dès la deuxième année de thèse, et il est nécessaire de structurer sa réflexion. Qu'est-ce que j'ai envie de faire de ma vie professionnelle ? Qu'est-ce que l'écosystème que je vise attendrait de moi ? Voilà les deux questions principales qui doivent diriger la réflexion, tout en s'ouvrant à toutes les possibilités.

Avec un maître mot : être actif et prendre sa carrière à bras le corps.

Vincent Mignotte, directeur de l'ABG, va développer la méthode et les recommandations que son expérience au sein de l'association a formées au fil des années.

> SOIRÉE DU JEUDI 4 AVRIL

Programme :

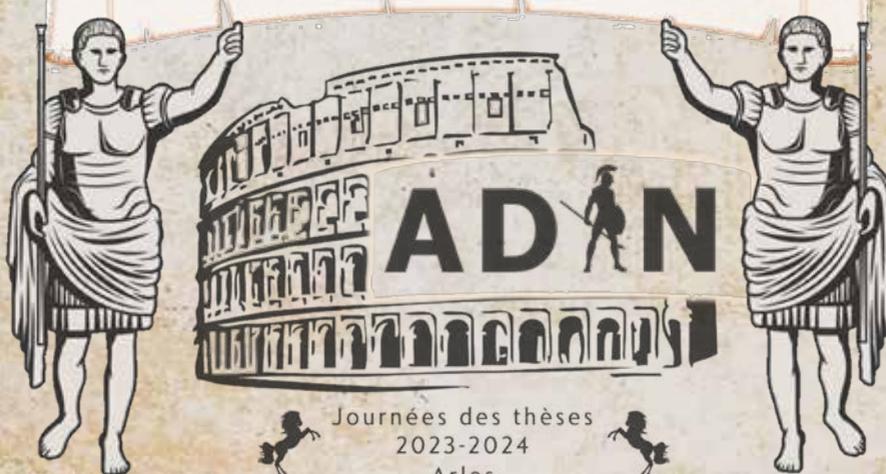
Activités ADIN

2 avril 16H30 - 18H30

Twister, Balle au prisonnier, Jenga

Soirée ADIN  
4 avril 2024 à 21h

Thème « Rome Antique »



Prix pour le meilleur  
déguisement



## ➤ VENDREDI 5 AVRIL

par Marc Thibault,  
Chef de projet Gestion et restauration de zones humides,  
expert de la Tour du Valat

### Visite commentée des anciens salins de Camargue



Crédit photo: Marc Thibault

*Sansouires restaurées, Enfores de la Vignolle.*

Le site des étangs et marais des salins de Camargue, situé sur les communes d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône, correspond à la partie occidentale du salin de Giraud créé en 1855. Fondé à proximité du Grand Rhône, ce salin s'est progressivement étendu vers l'ouest durant le XX<sup>ème</sup> siècle, pour atteindre la pointe de Beauduc à la fin des années 60. En effet, entre la fin des années 50 et les années 70, la Compagnie des salins du Midi entreprend de grands travaux d'aménagement visant à transformer en surfaces évaporatoires, les sansouires, dunes et lagunes de ce secteur. Ces aménagements vont permettre à la compagnie de monter en puissance et de viser des productions annuelles d'un million de tonnes de sel de mer.

... / ...

A partir des années 90, le salin de Giraud se trouve confronté à plusieurs difficultés économiques liées à la volatilité du marché du sel. Plusieurs plans sociaux se succèdent, et à partir de 2007 la vente d'une partie des terrains est envisagée. Entre 2008 et 2012, le Conservatoire du littoral s'est ainsi rendu propriétaire de plus de 6500 hectares.

La gestion de ces propriétés du Conservatoire du littoral a été confiée au Parc Naturel Régional de Camargue, qui la coordonne, en partenariat avec la Société Nationale de Protection de la Nature et la Tour du Valat. Les principaux objectifs fixés pour la restauration du site sont les suivants :

- le rétablissement d'un fonctionnement hydrologique plus naturel qui passe notamment par la reconnexion avec les hydrosystèmes alentours ;
- la reconstitution des écosystèmes littoraux caractéristiques des lagunes littorales méditerranéennes et des fronts de mer sableux ;
- le maintien ou l'augmentation de la capacité d'accueil des oiseaux d'eau coloniaux ;
- la mise en œuvre d'une gestion adaptative à l'élévation du niveau de la mer, notamment au travers d'un retrait maîtrisé et progressif du trait de côte dans les secteurs soumis à l'érosion ;
- l'intégration des problématiques économiques locales, notamment la situation du village de Salin-de-Giraud, en veillant à offrir des possibilités de découverte et de diversification économique douces et respectueuses des objectifs du Conservatoire et des autres partenaires de la gestion.

La visite proposée à l'IRSN sera l'occasion d'évoquer les enjeux et les actions concernant la restauration écologique du site et son adaptation aux effets du changement climatique, et permettra de montrer les changements paysagers intervenus depuis l'acquisition par le Conservatoire du littoral.

**Date et lieu de RV pour la visite :**

5 avril 2024, à 9h.

**Durée prévue de la visite :** 2 heures

**Contact :** Marc Thibault, thibault@tourduvalat.org 06 84 70 75 53

## > VALORISATION DE LA RECHERCHE

### Et si vous déposiez un brevet ?

Au cours de vos travaux de recherches, il est possible que vous fabriquiez un nouveau dispositif de mesure, que vous mettiez au point de nouvelles formulations chimiques ou développiez un procédé pour obtenir des mesures jusque-là inaccessibles.

Vos résultats peuvent être qualifiés d'invention et prétendre à être protégés par un brevet.

#### Qu'est-ce qu'une invention ?

L'invention est décrite comme une solution technique à un problème technique. Cette notion de technique peut être entendue de manière large. On peut ainsi breveter un produit (dispositif, médicament...), un procédé (s'il s'agit du procédé spécifique permettant d'obtenir un produit) ou une application (y compris une nouvelle application d'un produit).

Pour être brevetable, cette invention doit respecter trois critères : la nouveauté (pas de communication scientifique en amont du dépôt), « l'activité inventive » (l'invention ne doit pas être évidente au regard de l'état de la technique) et la susceptibilité d'application industrielle (les résultats peuvent être reproduits).

Certains résultats ne sont pas brevetables comme les logiciels, les méthodes mathématiques ou les races animales. Demandez-nous conseil.

#### Devenez inventeur !

Si vous mettez au point une invention, vous gagnez le statut d'inventeur et vous êtes cité comme tel dans le brevet. C'est un gage de capacité technique auprès de vos futurs employeurs et peut faire la différence sur un CV. De plus, un brevet est l'équivalent d'une seconde publication !

En tant qu'inventeur, vous percevez une rémunération supplémentaire sous forme de plusieurs primes : au dépôt de la demande de brevet, à la délivrance du brevet et à la commercialisation de l'invention.

#### Pour en savoir plus

Si vous avez besoin de compléments d'informations ou pensez que vos travaux de thèse aboutiront à une invention et que celle-ci pourrait faire l'objet d'une demande de brevet, n'hésitez pas à contacter le service de valorisation du SP<sup>3</sup>In par mail à l'adresse suivante [ipiv@irsn.fr](mailto:ipiv@irsn.fr)

Le SP<sup>3</sup>In pourra vous conseiller et prendre en charge les démarches de protection et de valorisation.

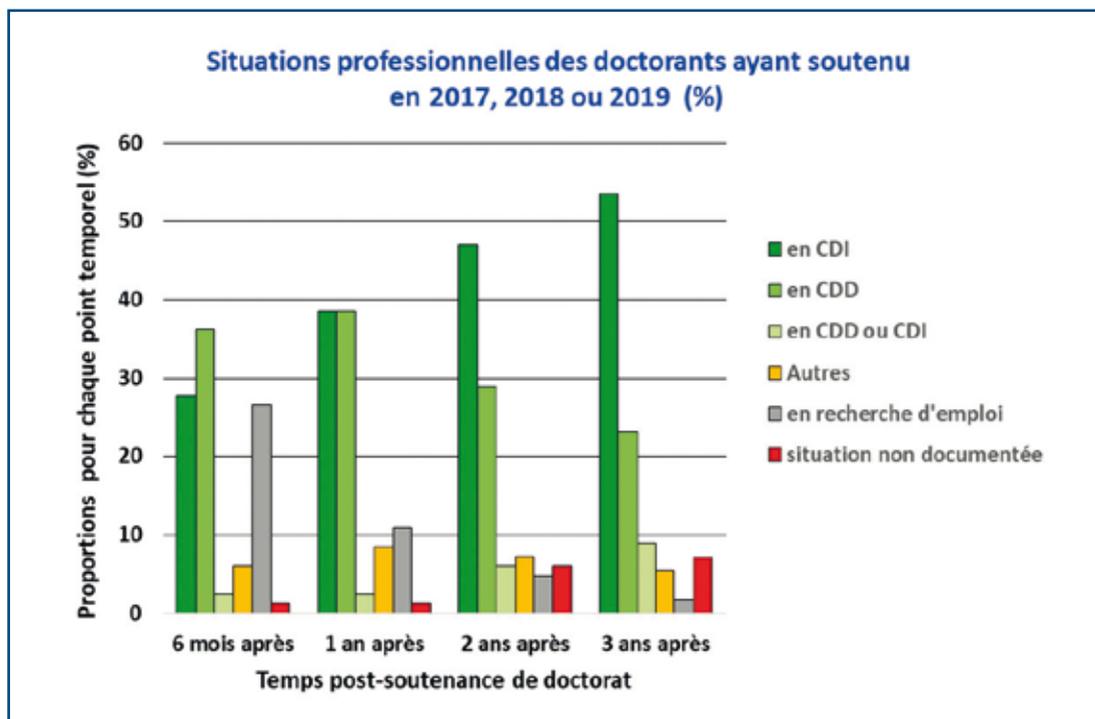
## DEVENIR PROFESSIONNEL DES DOCTORANTS DE L'IRSN, GENERATIONS 2017 À 2019

IRÈNE SOROKINE-DURM (DST / SP<sup>3</sup>IN)

L'IRSN réalise annuellement, depuis près de 15 ans, une enquête interne pour connaître la situation professionnelle des docteurs issus de l'Institut.

Ainsi, une analyse précédente sur la période 2007 – 2015 indiquait que 60% des docteurs issus de l'IRSN avaient trouvé un emploi dans les 3 mois suivant la soutenance de thèse. Trois ans après l'obtention du doctorat, moins de 5% des docteurs étaient en recherche d'emploi, à comparer aux diverses enquêtes statistiques françaises qui s'accordent sur des taux de chômage à 3 ans de l'ordre de 6- à 10%, données variant selon le type d'enquête<sup>[1]</sup> et selon les domaines scientifiques des doctorats.

La dernière analyse réalisée concerne les docteurs diplômés sur la période 2017 - 2019 (enquête arrêtée à mi-décembre 2021). Il en ressort que 6 mois après la date de soutenance de thèse, 2/3 des nouveaux docteurs (83 personnes concernées) ont un emploi, en Contrat à durée déterminée (CDD) ou indéterminée (CDI), avec néanmoins une majorité de CDD. Le ratio CDD vs. CDI s'équilibre dès 1 an post-soutenance et la différence au profit des CDI est bien nette à 2 ans après.



Trois ans après l'obtention du doctorat, 48 docteurs sur les 52 dont la situation est bien connue ont obtenu un CDD ou un CDI (situations non documentées exclues) et 1 seul docteur est en recherche d'emploi (1 autre est en stage de professionnalisation, 1 attend son affectation à l'Éducation nationale et enfin 1 est devenu agent immobilier indépendant). Cela représente un taux d'emploi contractualisé de 92 %, valeur comparable aux 91 % de taux d'emploi de l'enquête ministérielle, à 3 ans, pour les nouveaux diplômés de doctorat de 2014.

[1] CEREQ, MESRI / SIES, Adoc talent Management, etc.

Par ailleurs, l'employabilité des docteurs apparaît variable selon les disciplines. Le tableau ci-après illustre ce constat en répartissant la situation professionnelle à 1 an après soutenance de thèse des 83 docteurs de la période 2017-2019 selon l'Unité de recherche (UR) de l'IRSN à laquelle ils appartenaient lors de leur doctorat.

| 1 AN APRÈS SOUTENANCE<br>(nombre de personnes) | UR<br>ENVIRONNEMENT | UR<br>RADIOPROTECTION<br>HOMME | UR<br>SÛRETE |
|------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------|
| En CDI                                         | 7                   | 6                              | 19           |
| Déjà en CDI à l'IRSN                           | 0                   | 1                              | 1            |
| En CDD                                         | 11                  | 7                              | 14           |
| En CDD ou CDI                                  | 1                   | 0                              | 1            |
| Autres                                         | 2                   | 3                              | 2            |
| En recherche d'emploi                          | 6                   | 0                              | 3            |
| Situation non documentée                       | 0                   | 1                              | 0            |
| <b>TOTAUX</b>                                  | <b>27</b>           | <b>18</b>                      | <b>40</b>    |

Ainsi, le meilleur score en termes d'emploi à 1 an est obtenu par l'UR « Sûreté » qui accueille des disciplines telles que les mathématiques, la physique, les sciences de l'ingénieur ou encore l'informatique. Cette tendance est cohérente avec celle affichée par l'édition 2021 de *L'état de l'Enseignement supérieur de la Recherche et de l'Innovation en France*<sup>[2]</sup> d'obtention d'un CDI-à-1-an supérieure pour les Sciences et leurs interactions (mathématiques, physique, sciences de l'ingénieur, informatique).

[2] [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR14\\_RESUME/Letat\\_de\\_l\\_enseignement\\_superieur\\_de\\_la\\_recherche\\_et\\_de\\_l\\_innovation\\_resume/](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR14_RESUME/Letat_de_l_enseignement_superieur_de_la_recherche_et_de_l_innovation_resume/)

# Accéder à l'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

*Besoin de consulter des articles scientifiques, d'accéder à des ressources électroniques (ex: Scopus, Science direct,...).*

*Besoin d'une recherche bibliographique, d'une veille thématique ?*

*Besoin de commander un ouvrage ?*

*Retrouvez-vous sur le portail My IRSN !*



**MyIRSN/Mes outils et ressources/Management des connaissances/Ressources documentaires, abonnements et veilles**

Vos contacts : [myriam.dulor@irsn.fr](mailto:myriam.dulor@irsn.fr) , [valerie.salmon@irsn.fr](mailto:valerie.salmon@irsn.fr)  
et [karen.payrar-aergon@irsn.fr](mailto:karen.payrar-aergon@irsn.fr)  
DTR / D2MC2 / SEARCH



# JEUNES CHERCHEURS

## Un accès facilité aux connaissances

### Découvrez ASK

# IRSN [ASK



**ASK** est le moteur de recherche IRSN qui indexe en « **EXPERTISE RECHERCHE** » :

- les **documents d'expertise** dans les domaines de la sûreté des installations nucléaires de base françaises, de la santé-radioprotection, de la crise et de l'environnement produits par l'IRSN ;
- les **documents concernant la recherche** : les rapports scientifiques, les thèses, les publications et communications ;
- les **collections des ouvrages scientifiques IRSN** : sciences et techniques, documents de référence, ligne directrice, HDR ;
- les **descriptifs des boîtes d'archives IRSN**;
- le **retour d'expérience transverse** (Fiches REX, Rapports REX, la base de REX ARIA du BARPI);
- les **textes réglementaires et para réglementaires** relatifs aux activités du nucléaires.

Votre Contact : [valerie.ganivet@irsn.fr](mailto:valerie.ganivet@irsn.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH



## Diffuser en libre accès vos travaux scientifiques sur l'archive HAL-IRSN



 <https://hal-irsn.archives-ouvertes.fr/>

« **OUVERT AUTANT QUE POSSIBLE ET FERMÉ QUE SI NÉCESSAIRE** »

Le « libre accès » (*open access*) vise à garantir un accès numérique gratuit, immédiat et permanent aux publications et aux données associées, sans barrière technique ni juridique.



En tant que doctorants, vous devez référencer vos articles scientifiques et communications à congrès, accompagnés, autant que possible, des textes intégraux (ou poster ou power point) sur l'archive HAL-IRSN.

**Le diffusion en libre accès de vos travaux scientifiques permet d'augmenter votre visibilité numérique et de rendre la science accessible à tous.**

Pour les formations et toutes questions : [irsn-hal@irsn.fr](mailto:irsn-hal@irsn.fr)  
DTR / D2MC2 / SEARCH



# JEUNES CHERCHEURS

Découvrez vos archives

**Toute la connaissance passée de  
l'Institut pour vous aider à construire  
l'avenir**



*Nous conservons sur nos sites les archives de l'IRSN ainsi que de ses prédécesseurs (SCPRI, OPRI, IPSN). Ce fonds unique regorge de connaissances inédites qui attendent encore d'être découvertes.*



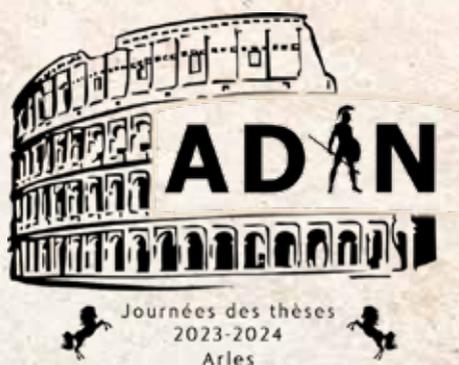
Rendez-vous sur  **SPARK** Archives ou via **ASK** pour rechercher et accéder aux archives de l'IRSN ou contactez les archivistes !

Votre contact : [camille.bouchain@irsn.fr](mailto:camille.bouchain@irsn.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH



# Découvrez...



## Nos missions ?

Souder les doctorants des différents sites de l'IRSN à travers divers événements: afterworks, activités de cohésion, sorties culturelles...

Aider les étudiants à se professionnaliser :  
réalisation de cartes de visites, photos  
professionnelles, soirée networking

Apporter un soutien pratique dans les tâches  
administratives liées à la vie de doctorant

## Pour nous rejoindre...



[adin@irsn.fr](mailto:adin@irsn.fr)

et recevez le formulaire d'inscription !

## Le bureau...

Vice-président **FAR** Théo  
Président Quentin  
Vice-présidente **CAD** Diane



Evènements  
Arthur

Trésorerie  
Anne-Laure  
Alban



Secrétariat **FAR** Florian  
Communication Sarmini  
Claire  
Secrétariat **CAD** Martial

**FAR**



Toutes les actualités sur  
les groupes WhatsApp

**CAD**



ASTHEC  
ASSOCIATION DES THESARDES DE CADARACHE



L'Association des Thésards de Cadarache (ASTHEC) a pour objectif de réunir les étudiants, doctorants, post-docs, alternants, apprentis et stagiaires du centre du CEA de Cadarache.

Notre objectif est de faciliter au maximum l'arrivée des nouveaux arrivants grâce à des événements d'intégration et à la promotion des activités scientifiques du centre de Cadarache.

Plusieurs événements sont réalisés durant l'année par un bureau composé à 100% de doctorants du centre:

- Afterworks pour boire un verre ensemble et se connaître
- Visites extérieures à des installations scientifiques
- Activité en plein air (randonnées, camping)
- Visites aux installations internes de Cadarache pour promouvoir les activités dans le centre.

Joignez-vous à nous afin de profiter de différentes activités et de rencontrer les autres membres du centre de Cadarache!

La possibilité d'entrer dans le bureau est possible toutes les années et est ouvert à toutes !



Maria Chiara Notarangelo  
Président  
IRESNE



Timothée Devictor  
Vice-Président  
IRESNE



Maria Jiménez  
Treasurer  
BIAM



Alexis Huart  
Secretary  
IRFM



Maylis Carrard  
External communication  
IRFM

Si vous voulez participer à nos activités n'hésitez pas à nous contacter à notre adresse email pour être ajouté à la mailing List : [asthec.bureau@gmail.com](mailto:asthec.bureau@gmail.com)

Rejoignez-nous sur les réseaux sociaux:

- Instagram: [https://www.instagram.com/asthec\\_cad/](https://www.instagram.com/asthec_cad/)
- Facebook: <https://fr-fr.facebook.com/groups/asthec>

En espérant vous rencontrer très bientôt!

## LISTE DES SERVICES ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS

### PSN : Pôle Sûreté Nucléaire

#### PSN - RES : Direction de la recherche en sûreté

PSN - RES / SEREX : Service d'Étude et de Recherche Expérimentale

**L2EC** : Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie

**LE2M** : Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux

PSN - RES / SAM : Service des Accidents Majeurs

**LEPC** : Laboratoire d'étude de la physique du corium

**LETR** : Laboratoire d'étude du corium et du transfert des radioéléments

PSN - RES / SCA : Service du Confinement et de l'Aérodispersion des polluants

**LECEV** : Laboratoire d'expérimentations en confinement, épuration et ventilation

**LEMAC** : Laboratoire d'études et de modélisation en aérodispersion et confinement

**LPMA** : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

PSN - RES / SA2I : Service des Agressions Internes et des risques Industriels

**LEF** : Laboratoire d'expérimentation des feux

**LIE** : Laboratoire de l'incendie et des explosions

PSN - RES / SEMIA : Service de Maîtrise des Incidents et Accidents

**LSMA** : Laboratoire de statistique et des méthodes avancées

PSN - RES / SNC : Service de Neutronique et des risques de Criticité

**LN** : Laboratoire de neutronique

#### PSN - EXP : Direction de l'expertise de sûreté

PSN - EXP / SES : Service d'Expertise des équipements et des Structures

**LMAPS** : Laboratoire de modélisation et d'analyse de la performance des structures

**BECM** : Bureau d'Expertise des Contrôles non destructifs et des matériaux

PSN - EXP / SHOT : Service Homme Organisation Technologie

**LSHS** : Laboratoire de sciences humaines et sociales

... / ...

## **PSE: Pôle Santé Environnement**

### **PSE-SANTE : Direction de la Santé**

**PSE-SANTE / SDOS:** Service de Dosimétrie

**LDRI:** Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants

**LEDI:** Laboratoire d'évaluation de la dose interne

**LMDN:** Laboratoire de micro-irradiation, de métrologie et de dosimétrie neutrons

**PSE-SANTE / SERAMED:** Service de Recherche en Radiobiologie et en Médecine régénérative

**LRMed:** Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales

**LRAcc:** Laboratoire de Radiobiologie des expositions accidentelles

**PSE-SANTE / SESANE:** Service de Recherche sur les Effets Biologiques et Sanitaires des rayonnements ionisants

**LEPID:** Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants

**LRTOX:** Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale

**LRSI:** Laboratoire de recherche en Radiochimie, Spéciation et Imagerie

**PSE-SANTE / SESUC:** Service des Situations d'Urgence et d'Organisation de Crise

**LERN:** Laboratoire d'Economie du Risque Nucléaire

### **PSE-ENV : Direction de l'Environnement**

**PSE-ENV / SAME:** Service d'Analyses et de Métrologie de l'Environnement

**LERCA:** Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique

**PSE-ENV / SCAN:** Service de Caractérisation des sites et des Aléas Naturels

**BEHRIG:** Bureau d'expertise en hydrogéologie et sur les risques d'inondation et géotechniques

**BERSSIN:** Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations

**PSE-ENV / SPDR:** Service des Pollutions et des Déchets Radioactifs

**LETIS:** Laboratoire d'Etude et de recherche sur les Transferts et les Interactions dans les Sous-sols

**LT2S:** Laboratoire de recherches sur les Transferts dans les Sites et Sols pollués

**UEMIS:** Unité d'expertise et de modélisation des installations de stockage

**PSE-ENV / SERPEN:** Service de Radioprotection des Populations et de l'Environnement

**LECO:** Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides

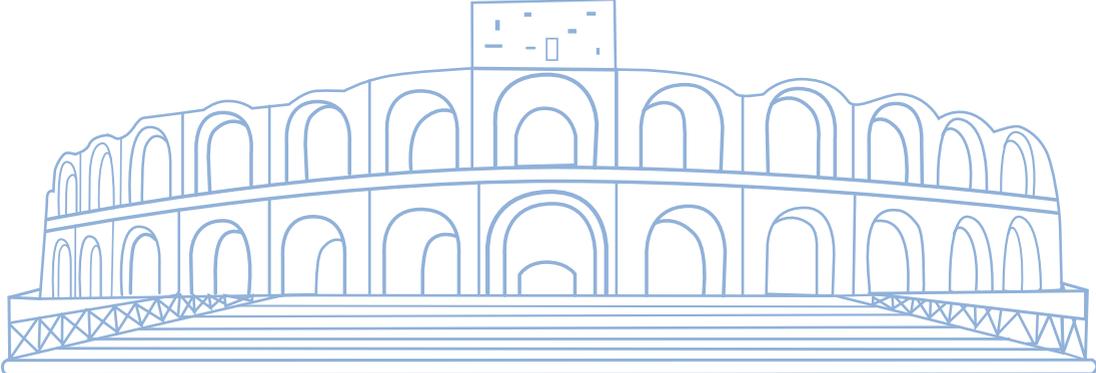
**PSE-ENV / STAAR:** Service des Transferts Atmosphériques et Aquatiques des Radionucléides

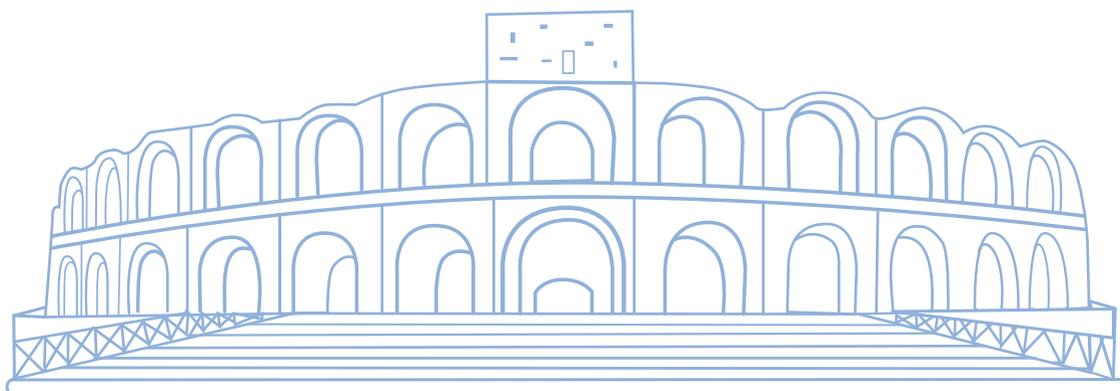
**LERTA:** Laboratoire Expérimental de Recherche et d'expertise sur les Transferts des radionucléides dans le milieu Atmosphérique

**LRTA:** Laboratoire de Recherche sur les Transferts des radionucléides au sein des écosystèmes Aquatiques

*Les Journées des thèses sont organisées par la Direction de la stratégie (DST).*

Réalisation du livret 2024: Sandrine Marano - Chargée de mission formation par la recherche /IRSN  
Véronique Laget 06 64 30 99 72, Maquettiste.





**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31, avenue de la Division Leclerc  
92260 - Fontenay-aux-Roses  
RCS Nanterre 546 018

**Référence :** DST/SP<sup>3</sup>In/2024-00031

**COURRIER**

BP.17 - 92262 Fontenay-aux-roses  
Cedex

**TÉLÉPHONE**

+33 (0)1 58 35 88 88

**SITE INTERNET**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

**E-MAIL**

[contact@irsn.fr](mailto:contact@irsn.fr)

 [@irsn\\_france](https://twitter.com/irsn_france)

