



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# LIVRET DES THÈSES 2022

28 - 31 mars

**Journées  
des thèses  
2022**

La Colle-sur-Loup



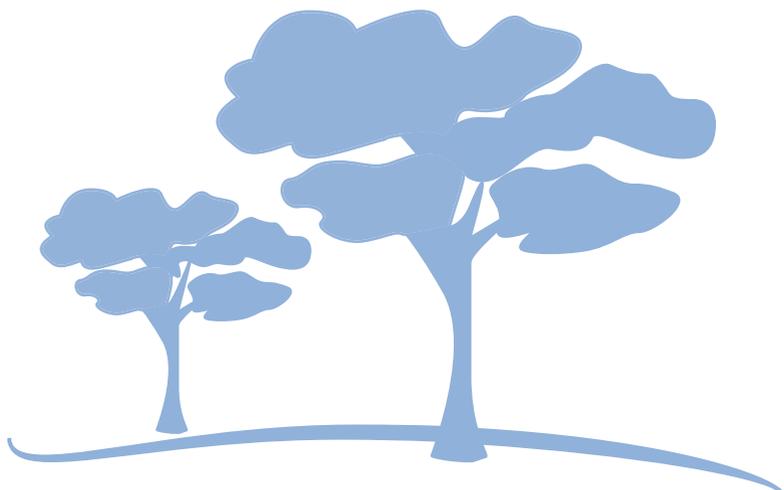
MEMBRE DE

**ETSON**

# JOURNÉES DES THÈSES 2022

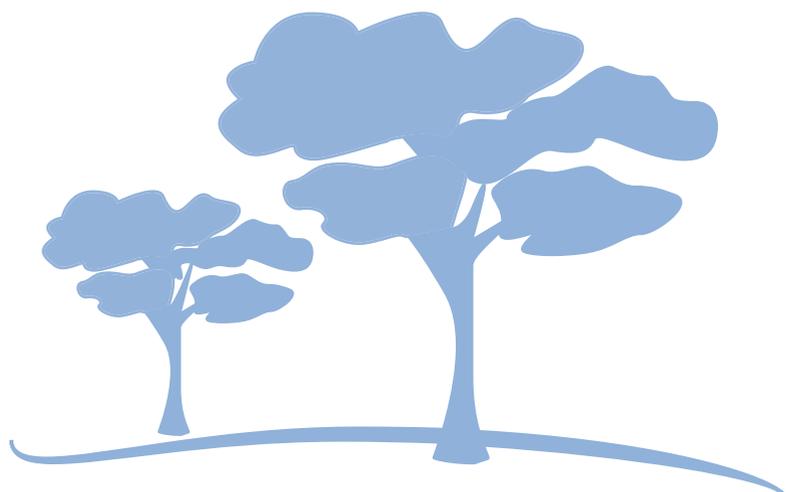
» » » 28 - 31 mars





# SOMMAIRE

<b>► PROGRAMME DES JOURNÉES DES THÈSES 2022</b>	P. 5 - 10
<b>► AU FIL DES SESSIONS</b>	
- Les sessions orales du mardi 29 mars	P. 11 - 56
- Les sessions orales du mercredi 30 mars	P. 57 - 108
- Les sessions posters	P. 109 - 140
<b>► LES SOIRÉES ET AUTRES INFORMATIONS</b>	P. 141 - 155
- Soirée table ronde - débat : empreinte carbone de la recherche : que pèse-t-elle, comment la mesurer, comment la réduire ?	P. 141
- Concours « 3 minutes pour une thèse »	P. 143
- Soirée FLUO de l'ADi[N]	P. 144
- Et si vous déposiez un brevet ?	P. 145
- Devenir professionnel des doctorants de l'IRSN, générations 2017 à 2019	P. 146 - 147
- L'information scientifique et technique	P. 148 - 151
- Présentation de l'ADi[N]	P. 152 - 153
- Présentation de l'ASTHEC	P. 154 - 155
<b>► INDEX DES PRÉSENTATIONS</b>	P. 156 - 158
<b>► LISTE DES SERVICES ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS</b>	P. 159 - 160



## ► Lundi 28 mars

13h45 - 15h15 ► **Installation et buffet**

15h30 - Salle Miro

### ► **Accueil des doctorants de 1<sup>re</sup> année**

La place de votre projet dans la recherche à l'IRSN

Intervenants : Jean-Christophe Niel, Directeur Général ; Didier Gay, Adjoint au directeur de la stratégie, délégué aux affaires scientifiques et/ou Thierry Bourgois, Chef du service de la Programmation, des partenariats, de la prospective et de l'appui à l'innovation

- La stratégie scientifique de l'IRSN en 18 questions
- La recherche à l'IRSN et la place du doctorant dans l'organisation programmatique IRSN

« Vous avez dit ouverture à la société ? »

Intervenante : Audrey Lebeau-Livé, Cheffe du Service des politiques d'ouverture à la société

Construction du parcours professionnel durant la thèse

- Le plan de formation transverse doctorant, Intervenant : Université interne
- Bilan de la formation à et par la recherche – Focus sur l'insertion professionnelle des doctorants de l'IRSN, Intervenant : Irène Sorokine-Durm, Chargée de mission bibliométrie et reporting en Formation à et par la recherche au DST/SP<sup>3</sup>IN
- Le projet professionnel, une alliance entre le cœur, la raison et l'action, Intervenant : Vincent Mignotte, Directeur de l'Association Bernard Grégory (ABG)

15h30 Salle Kandinsky ► **Activité de cohésion - Doctorants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> années - Olympiades**

15h30 Salle Renoir / Matisse ► **Échanges sur la recherche augmentée en sûreté nucléaire**

19h00 ► **Apéritif de bienvenue**

19h30 ► **Dîner**

20h45 Salle Riviera

► **Ouverture des Journées des thèses** par Jean-Christophe Niel, Directeur général de l'IRSN

► **Soirée table ronde - débat**

Empreinte carbone de la recherche : que pèse-t-elle, comment la mesurer, comment la réduire ?

## ► Mardi 29 mars

08h30 - 9h30 Salle Riviera **SESSION PLÉNIÈRE**

### ► **Santé - Effets biologiques des rayonnements ionisants - Radiobiologie et radiopathologie**

Manon GUILLOU (2<sup>e</sup> année) - Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle.

Sarah BRAGA-COHEN (3<sup>e</sup> année) - Rôles des sous-populations de macrophages dans les lésions pulmonaires induites par une irradiation stéréotaxique chez la souris.

Polina ARSENTEVA (2<sup>e</sup> année) - Modélisation multi-échelle de l'Efficacité Biologique Relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants.

09h30 - 9h50 ► **Pause**

09h50 - 10h20 Salle Renoir / Matisse **SESSION PARALLÈLE**

### ► **Environnement - Impact d'un rejet radioactif sur les populations animales**

Magali SCHIANO DI LOMBO (3<sup>e</sup> année) - Comparaison d'effets physiologiques radio-induits par les rayonnements beta reçus à l'ADN et à l'organisme entier chez le poisson zèbre, *Danio rerio*.

Clément CAR (3<sup>e</sup> année) - Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants dans les zones d'exclusion de Tchernobyl et Fukushima.

## 09 h 50 - 11 h 15 SESSION PARALLÈLE

Salle Riviera

### ► Santé - Mesures biologiques et radiothérapie

Antonin DESCHEMPS (2<sup>e</sup> année) - Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologiques.

Mohammed BENSIALI (3<sup>e</sup> année) - INDORI : Intégration des Incertitudes associées à la Dosimétrie personnalisée dans l'Optimisation des Radiothérapies Internes.

Louis ERMENEUX (2<sup>e</sup> année) - Dosimétrie des systèmes IRM-Linac utilisés en radiothérapie externe : étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D.

Alexandra WARTEL (3<sup>e</sup> année) - Activité humaine et performance transversale  
- Le cas de la préparation des traitements en radiothérapie externe.

## 09 h 50 - 10 h 45 SESSION PARALLÈLE

Salle Kandinsky

### ► Sûreté - Comportement du béton (vieillesse, séisme)

Joe MAALOUF (2<sup>e</sup> année) - Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI).

Maryam TRAD (2<sup>e</sup> année) - Une nouvelle stratégie de modélisation enrichie pour l'interface acier-béton dans le contexte des éléments de plaques multicouches : application à l'évaluation des spectres de plancher.

Julien CLEMENT (2<sup>e</sup> année) - Caractérisation *in situ* de l'interaction sol-structure dynamique, au travers de la mesure de la fonction d'impédance.

## 11 h 00 - 12 h 00 Salle Klee SESSION POSTERS

12 h 30 - 13 h 30 ► Déjeuner

## 13 h 45 - 15 h 10 SESSION PARALLÈLE

Salle Kandinsky

### ► Sûreté - Épuration - filtration des effluents gazeux radioactifs

Mohamad FARHAT (3<sup>e</sup> année) - Étude expérimentale de l'hydrodynamique du barbotage pour différents régimes : applications au piégeage des iodes en situations de FCVS et RTGV.

Marie LECOQ (3<sup>e</sup> année) - Étude du comportement dynamique d'un filtre constitué d'un médium métallique en présence d'eau.

Julie NGUYEN SADASSIVAME (2<sup>e</sup> année) - Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants de type Metal-Organic Framework (MOF).

Aurélien RIOT (3<sup>e</sup> année) - La rétention du tritium dans l'installation ITER : du suivi de l'inventaire à l'évaluation du terme source en situations accidentelles.

## 13 h 45 - 14 h 50 SESSION PARALLÈLE

Salle Renoir / Matisse

### ► Environnement - Mesure des radionucléides

Paul MALFRAIT (2<sup>e</sup> année) - Démélange spectral parcimonieux par fusion de données spatiale et/ou temporelle pour la détection rapide d'événements radiologiques par spectrométrie gamma.

Coralie CARRIER (3<sup>e</sup> année) - Développement de nouvelles méthodes d'analyse de l'iode 129 à bas niveau appliquées à la compréhension des mécanismes de transfert de l'iode dans l'environnement.

Anaëlle MAGRE (3<sup>e</sup> année) - Détermination du rapport isotopique  $^{135}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$  dans des échantillons de l'environnement à très bas niveau de radioactivité. Utilisation de ce nouveau traceur pour identifier les sources de césium dans l'environnement.

15 h 10 - 15 h 30 ► Pause

## 15h30 - 16h30 SESSION PARALLÈLE

Salle Renoir / Matisse

### ► Environnement - Risque d'inondation et dispersion atmosphérique des radionucléides

Youness EI-OUARTASSY (2<sup>e</sup> année) - Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejet accidentel dans l'atmosphère : méthodologie, propagation des incertitudes et comparaison à des mesures radiologiques dans l'environnement.

Charlie SIRE (2<sup>e</sup> année) - L'inversion robuste comme outil d'analyse du risque – application aux défaillances d'ouvrages (naturels et artificiels) dans les analyses probabilistes d'inondation.

Laurie SAINT CRIQ (3<sup>e</sup> année) - Estimation des événements extrêmes en utilisant de l'information régionale et historique.

## 15h30 - 16h30 SESSION PARALLÈLE

Salle Riviera

### ► Santé - Toxicité des rayonnements ionisants

Goran RIAZI (2<sup>e</sup> année) - Effet de différentes doses de rayonnements ionisants sur la pathologie anévrismale aortique chez la souris.

Marie FREREJACQUES (2<sup>e</sup> année) - Étude *Adverse Outcome Pathway* (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide à l'aide d'un modèle organoïde rénal.

Géraldine LANDON (3<sup>e</sup> année) - Étude de l'efficacité *in vitro* et *in vivo* de formes galéniques de molécules de la famille des biphosphonates pour le traitement de la contamination interne par le strontium et le cobalt.

## 15h30 - 16h55 SESSION PARALLÈLE

Salle Kandinsky

### ► Sécurité - Risque d'explosion en situation d'accident grave de réacteur - Physique des aérosols

Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA (3<sup>e</sup> année) - Étude de l'empoisonnement des recombineurs auto-catalytiques passifs.

Linkai WEI (3<sup>e</sup> année) - Développement d'un nouveau modèle d'explosion de vapeur pour le logiciel MC3D.

Emmanuel REYES (2<sup>e</sup> année) - Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : modélisation explicite du flux de Stefan et de sa contribution à la diffusiophorèse.

Modou MBAYE (3<sup>e</sup> année) - Remise en suspension particulaire par impact de jets liquides contaminés sur une surface.

16h55 - 17h15 ► Pause

## 17h15 - 18h15 SESSION PLÉNIÈRE

Salle Riviera

### ► Sécurité - Modélisation micromécanique des matériaux

Clément TOSI (2<sup>e</sup> année) - Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l' $UO_2$  irradié.

Zafilaza Armi MANOROSOA (2<sup>e</sup> année) - Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grain dans l' $UO_2$ .

Sirine AL DANDACHLI (2<sup>e</sup> année) - Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de la réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales.

19h30 - 20h30 ► Dîner

21h00 - 22h00 ► Concours - 3 minutes pour une thèse

## ➤ Mercredi 30 mars

08 h 30 - 09 h 30 **SESSION PLÉNIÈRE**

Salle Riviera

### ➤ **Sûreté - Compréhension et modélisation de l'incendie**

**Emeline GEORGES (2<sup>e</sup> année)** - Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé.

**Safir HADDAD (2<sup>e</sup> année)** - Étude de la propagation et du contrôle des fumées d'incendie en galeries souterraines complexes : application à la maîtrise du risque incendie pour des configurations de stockage de déchets radioactifs.

**Laura VASTIER (3<sup>e</sup> année)** - Étude de la propagation de flamme dans une atmosphère gazeuse représentative de la phase tardive d'un accident grave dans un REP.

09 h 30 - 09 h 50 ➤ **Pause**

09 h 50 - 10 h 55 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Kandinsky

### ➤ **Sûreté - Thermohydraulique et neutronique en situation accidentelle**

**Giuseppe SPINA (2<sup>e</sup> année)** - Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire.

**Juan Esteban LUNA VALENCIA (3<sup>e</sup> année)** - Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical vapeur / gouttes à l'échelle d'un sous-canal.

**Kévin FRÖHLICHER (3<sup>e</sup> année)** - Mise au point d'une méthode de réduction de variance pour l'optimisation de calculs de transitoires de puissance en Monte Carlo cinétique.

09 h 50 - 10 h 55 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Riviera

### ➤ **Santé - Thérapie cellulaire pour traiter les lésions radio-induites**

**Martin JESTIN (2<sup>e</sup> année)** - Modifications du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser la transplantation de cellules souches coliques.

**Mallia GEIGER (3<sup>e</sup> année)** - Effet d'une transplantation du microbiote fécal sur les atteintes épithéliales radio-induites du côlon de rat : Potentialisation de l'efficacité thérapeutique induite par les cellules stromales mésenchymateuses.

**Lydia BENSEMMANE (3<sup>e</sup> année)** - Impact de la fraction stromale-vasculaire du tissu adipeux pour la régénération de la muqueuse intestinale dans le syndrome gastro-intestinal radio-induit.

09 h 50 - 10 h 45 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Renoir / Matisse

### ➤ **Environnement - Processus de transfert des radionucléides**

**Tingting GENG (2<sup>e</sup> année)** - Identification des sources et des mécanismes de transport responsables de la dissémination des contaminants radioactifs à l'aval des anciens sites miniers à l'aide des isotopes stables de plomb.

**Zeinab MAWASSY (2<sup>e</sup> année)** - Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire de radionucléides sous forme particulaire.

**Louise DARRICAU (2<sup>e</sup> année)** - Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères : approches minéralogiques et modélisation géochimique.

11 h 15 - 12 h 15 Salle Klee **SESSION POSTERS**

12 h 30 - 13 h 30 ➤ **Déjeuner**

### 13h45 - 14h45 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Riviera

#### ► **Santé - Effets biologiques des rayonnements ionisants**

Yann THIBAUT (2<sup>e</sup> année) - Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire.

Kévin LALANNE (3<sup>e</sup> année) - Caractérisation de microfaisceaux d'ions et R&D sur l'installation MIRCOM.

Ahmad SLEIMAN (2<sup>e</sup> année) - Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode *C.elegans* : rôle de la mitochondrie et des dommages nucléaires.

### 13h45 - 15h10 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Renoir / Matisse

#### ► **Environnement - Stockage géologique de déchets nucléaires**

Charlotte DEWITTE (3<sup>e</sup> année) - Étude multi-physique de l'influence de la précipitation de M-S-H sur le comportement chemo-mécanique de matériaux cimentaires.

Jad EL ALAM (2<sup>e</sup> année) - Caractérisation des hétérogénéités hydriques et texturales des argiles gonflantes par la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) : application aux essais *in situ* de Modern2020 au Laboratoire de Recherche Souterrain à Tournemire.

Julie POUYA (3<sup>e</sup> année) - Modélisation chemo-mécanique du comportement des bétons soumis à des réactions sulfatiques externes.

Yara BARAKAT (3<sup>e</sup> année) - Impact des panaches salin / alcalin sur le gonflement et l'auto-colmatage d'une argile endommagée.

### 13h45 - 15h05 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Kandinsky

#### ► **Sûreté - Modélisation de l'incendie et de l'explosion**

Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY (2<sup>e</sup> année) - Modelling of Combustion-Turbulence Interaction for the Simulation of Fires in Confined and Ventilated Environments.

Jérémie JANIN (3<sup>e</sup> année) - Forçage volumique et lois de parois adaptatives pour un modèle de fermeture algébrique hybride RANS / LES.

Aubin BRUNEL (3<sup>e</sup> année) - Schémas de convection pour les équations de Navier-Stokes sur maillages généraux.

Raphaël GAVART (2<sup>e</sup> année) - Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type.

### 15h10 - 15h30 ► **Pause**

### 15h30 - 16h50 **SESSION PARALLÈLE**

Salle Renoir / Matisse

#### ► **Environnement - Transfert des radionucléides**

Thomas SEYER (2<sup>e</sup> année) - Ecosystem modelling in the North-Western Mediterranean Sea: structure and functioning of a complex system.

Déo-Gratias Kily SOURABIE (2<sup>e</sup> année) - Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie.

Dina OKHRIMCHUK (3<sup>e</sup> année) - Study of the long-term behaviour of <sup>137</sup>Cs atmospheric fallouts in French forests.

Nathan BODEREAU (3<sup>e</sup> année) - Sources et comportement du <sup>14</sup>C dans un fleuve nucléarisé : le cas du Rhône aval.

## 15h30 - 16h30 SESSION PARALLÈLE

Salle Riviera

### ► Santé - Épidémiologie des rayonnements ionisants

Anais FOUCAULT (3<sup>e</sup> année) - Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition médicale diagnostique aux rayonnements ionisants pendant l'enfance, au sein de la cohorte « Enfant Scanner ».

Mohamed Yassir ERRAHMANI (2<sup>e</sup> année) - Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein.

Julie LOPES (2<sup>e</sup> année) - Analyse du risque radio-induit de décès par cancer chez les personnels médicaux exposés aux rayonnements ionisants.

## 15h30 - 16h55 SESSION PARALLÈLE

Salle Kandinsky

### ► Sûreté - Phénomènes thermochimiques en situation accidentelle

Elouan LE FESSANT (3<sup>e</sup> année) - Étude expérimentale du rôle du bore sur la revaporisation de dépôts de produits de fission.

Sandra GYASI (3<sup>e</sup> année) - Study of the zirconium impact on the vaporization of the SIC rods under accidental conditions.

Jinjiang CUI (2<sup>e</sup> année) - Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF (Accident Tolerant Fuel).

Coralie LE MAOUT ALVAREZ (3<sup>e</sup> année) - Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en solutions tamponnées.

16h55 - 17h15 ► Pause

## 17h15 - 18h10 SESSION PLÉNIÈRE

Salle Riviera

### ► Environnement - Évaluation du risque sismique

Marion BAQUES (3<sup>e</sup> année) - Évolution spatio-temporelle de la sismicité de la zone Ubaye / Haute-Durance : apports pour la compréhension de la dynamique et de l'évolution des essaims de sismicité en domaine de faible déformation.

Mathilde BANJAN (3<sup>e</sup> année) - Le signal sédimentaire comme élément de caractérisation de l'activité sismique au front des Alpes depuis la dernière période glaciaire.

Loïc GISSELBRECHT (2<sup>e</sup> année) - Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs.

## 19h00 ► Remise du prix « 3 minutes pour une thèse » et du prix Poster

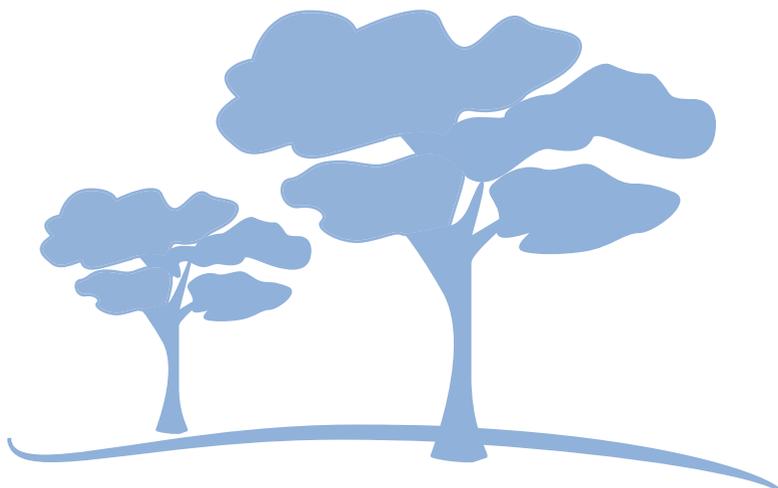
► Clôture des journées des thèses

19h30 - 20h30 ► Dîner

21h00 ► Soirée ADi[N], IRSN FLUO

## ► Jeudi 31 mars

10h30 ► Départ



➤ Mardi 29 mars

08 h 30 - 09 h 30 Salle Riviera

## SESSION PLÉNIÈRE

### ➤ SANTÉ - EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS - RADIOBIOLOGIE ET RADIOPATHOLOGIE

**Président: Fabien MILLIAT**

Chef du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales  
(PSE-SANTE / SERAME / LRMed)

**Manon GUILLOU** - Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle.

**Sarah BRAGA-COHEN** - Rôles des sous-populations de macrophages dans les lésions pulmonaires induites par une irradiation stéréotaxique chez la souris.

**Polina ARSENTEVA** - Modélisation multi-échelle de l'Efficacité Biologique Relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants.

## SUJET DE LA THÈSE

### Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle

Doctorante :	Manon GUILLOU
Date du début de la thèse :	29 / 09 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRAcc
Tuteur de thèse :	Morgane DOS SANTOS
Directeur de thèse :	Yolanda PREZADO - CNRS – Institut Curie
École doctorale :	Université Paris Saclay / ED576 : École doctorale PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN

---

La radiologie interventionnelle (RIn), utilisée pour le diagnostic et le traitement, est guidée par une imagerie de rayons-X de basse énergie (BE). Majoritairement bénéfique et maîtrisée, des surexpositions médicales accidentelles peuvent néanmoins se produire et des doses élevées (>10Gy) peuvent être délivrées, conduisant à l'apparition d'effets déterministes pouvant aller de l'érythème à la radionécrose. Le manque de connaissances sur les conséquences biologiques à BE, dû à l'hétérogénéité du dépôt de dose, rend le pronostic très incertain, notamment pour les tissus osseux. Ainsi, caractériser les effets biologiques de ce type d'exposition est essentiel pour améliorer la prise en charge des patients et la prédiction des risques.

Un nouveau modèle d'irradiation localisée de la patte a été développé sur le micro-irradiateur SARRP (Small Animal Radiation Research Platform) à 80kV chez des souris C57Bl6 / j, permettant de mimer les conditions d'exposition de la RIn. Les animaux sont irradiés selon différents protocoles : expositions uniques ( $K_{\text{air}}=15, 30$  ou  $45\text{Gy}$ ) ou répétées ( $K_{\text{air}}=2\times 15$  ou  $3\times 15\text{Gy}$ ) séparées d'une semaine, puis suivis quotidiennement par le scoring, le poids et les images laser Doppler. Des mesures dosimétriques par spectroscopie RPE sont réalisées à 6 temps post-irradiation afin d'évaluer la dose à l'os et d'étudier l'impact du remodelage osseux.

Le suivi lésionnel a montré que tous les protocoles ont des vitesses d'apparition des symptômes semblables mais un pic lésionnel plus ou moins intense, une vitesse de cicatrisation fortement dépendante du protocole et des expositions répétées se faisant sur une zone déjà lésée.

Les mesures dosimétriques permettent de déterminer la dose réellement absorbée à l'os le jour de l'irradiation et de déduire un facteur de conversion expérimental  $\sim 7$  entre la dose à l'os et celle dans l'air pour les expositions uniques. Ce facteur est légèrement inférieur pour les protocoles répétés. De plus, le signal RPE diminue avec le temps indépendamment du protocole.

La caractérisation de ce modèle préclinique nous a permis de classer les protocoles en fonction de la sévérité de la lésion. Les mesures dosimétriques permettent d'évaluer la dose réellement absorbée par l'os, et d'en déduire un facteur de conversion. Ce facteur élevé, dû à la forte hétérogénéité du dépôt de dose est cohérent avec la spécificité des rayonnements de BE. Ces mesures dosimétriques permettent également de mettre en évidence la mise en place des processus biologiques au niveau osseux matérialisés par la perte de signal RPE. Par la suite, l'impact de la réponse biologique sera caractérisé plus spécifiquement par analyses microCT et histologie.

SUJET DE LA THÈSE

Rôles des sous-populations de macrophages dans les lésions pulmonaires induites  
par une irradiation stéréotaxique chez la souris

Doctorante :	Sarah BRAGA-COHEN
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Agnès FRANCOIS
Directeur de thèse :	Agnès FRANCOIS
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Cancérologie, Biologie, Médecine, Santé
Financement de thèse :	IRSN

La radiothérapie stéréotaxique est une alternative thérapeutique pour 30% de patients à haut risque chirurgical, atteints de cancer bronchique primitif localisé. Certains patients développent des pneumopathies radiques. De nombreux macrophages, connus pour être impliqués dans les processus fibreux, ont été observés au site lésionnel dans des modèles précliniques d'irradiation stéréotaxique développés à l'IRSN. L'objectif de ce projet de thèse est de caractériser les sous-populations macrophagiques impliquées dans le développement des lésions pulmonaires induites par une irradiation en conditions stéréotaxiques chez la souris.

Les souris sont irradiées au niveau du poumon gauche avec un faisceau collimaté à 3x3 mm<sup>2</sup>, à une dose unique de 80 Gy (fibrose rapide) ou 60 Gy (fibrose progressive), et les lésions étudiées de 3 jours à 12 mois post-irradiation. Les lésions tissulaires sont suivies par imagerie scanner et histologie. Les sous-populations macrophagiques sont suivies par immunohistologie et cytométrie spectrale. Le rôle des macrophages dans le développement de la fibrose pulmonaire est abordé en comparant les lésions de souris sauvages (WT) à celles de souris CCR2KO (invalidées pour le gène CCR2), chez lesquelles le recrutement macrophagique est abrogé.

Le patch lésionnel se développe avec une cinétique identique chez les deux souches de souris, que ce soit lors d'une fibrose rapide ou progressive. Après 60 et 80 Gy, les souris CCR2KO semblent développer un œdème pulmonaire précoce, absent chez les souris WT, et présentent une augmentation plus précoce du pourcentage du volume pulmonaire « pauvrement aéré » que leurs homologues sauvages. En histologie, on observe un épaississement comparable des septas alvéolaires, signant une réaction similaire du parenchyme pulmonaire chez les deux souches de souris au niveau des poumons gauches, avec une répercussion sur le poumon droit après 80 Gy chez souris CCR2KO uniquement. Par ailleurs, le nombre de macrophages augmente de manière similaire avec le temps chez les deux souches de souris. Des analyses supplémentaires par cytométrie en flux sont en cours pour identifier les différentes sous-populations macrophagiques présentes à la lésion et mettre en évidence une différence éventuelle entre les deux souches de souris. L'absence de différence notable quant à la sévérité des lésions entre les deux souches interroge sur l'implication du récepteur CCR2 dans le recrutement des macrophages présents à la lésion pulmonaire après irradiation stéréotaxique. Enfin, et vu l'absence d'effet de l'invalidation du gène CCR2, des expériences de parabiose sont en cours afin d'objectiver le recrutement des macrophages depuis la circulation sanguine dans notre modèle.

## SUJET DE LA THÈSE

### Modélisation multi-échelle de l'Efficacité Biologique Relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants

Doctorante :	Polina ARSENTEVA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed Institut de Mathématiques de Bourgogne
Tuteur de thèse :	Mohamed Amine BENADJAOUD
Directeur de thèse :	Hervé CARDOT - Institut de Mathématiques de Bourgogne
École doctorale :	Université de Bourgogne / Carnot Pasteur
Financement de thèse :	IRSN / FEDER

---

More than 200 000 patients undergo radiotherapy in France every year. Similarly to other treatments, it may induce adverse side effects for healthy tissues situated close to the irradiated tumor. It is thus of substantial importance to study and compare different modes of radiotherapy that vary in dose, volume, energy, etc. with a goal of selecting such that minimize the potential undesirable consequences.

This work focuses on studying cellular response to irradiation, namely that of endothelial cells, a key actor in the appearance of radiation adverse effects. Specifically, we study the expression of different biological entities originating from multiple omics in-vitro data sets (e.g. transcriptomic measuring gene expression, proteomic for protein expression) that were collected for several time points. The common feature of all data sets is the presence of two experimental conditions: irradiated and non-irradiated. The quantity of interest is radio-induced fold change: a measure of irradiation effect represented by the difference between the two experimental conditions over time.

In the course of this project, multivariate ANOVA model is used to estimate fold changes as vectors with respect to time after irradiation. These estimations are thus subject to uncertainties that should be considered in subsequent investigations. The goal is to determine a small number of the most representative behavior types among the numerous biological entities that are considered as well as to identify potential biological pathways linked to the response to radiotherapy. To achieve this, we propose a new procedure based on performing simultaneous clustering and alignment of fold changes' temporal estimators. The clustering is distribution-based, which is motivated by the need to account for uncertainties and correlations between variables. In particular, k-medoids clustering is performed based on distances between random estimators of fold changes. This clustering procedure combined with time warping is computationally efficient and is able to capture various relationships between entities. In addition, a stochastic block model is inferred based on these results providing a representation of the biological network while distinguishing major clusters. The proposed approach has been evaluated through numerous simulation studies and show promising prospects on real data.

## ➤ Mardi 29 mars

09 h 50 - 10 h 20 Salle Renoir / Matisse

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ENVIRONNEMENT – IMPACT D’UN REJET RADIOACTIF SUR LES POPULATIONS ANIMALES

**Président : Patrick LALOI**

Chef du Laboratoire de recherche sur les effets des radionucléides sur les écosystèmes (PSE-ENV / SRTE / Leco)

**Magali SCHIANO DI LOMBO** - Comparaison d'effets physiologiques radio-induits par les rayonnements beta reçus à l'ADN et à l'organisme entier chez le poisson zèbre, *Danio rerio*.

**Clément CAR** - Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants dans les zones d'exclusion de Tchernobyl et Fukushima.

## SUJET DE LA THÈSE

**Comparaison d'effets physiologiques radio-induits par les rayonnements beta reçus à l'ADN et à l'organisme entier chez le poisson zèbre, *Danio rerio***

Doctorante :	Magali SCHIANO DI LOMBO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Yann PERROT (PSE-SANTE / SDOS / LDRI)
Directeur de thèse :	Béatrice GAGNAIRE -IRSN et Jérôme Cachot-CNRS
École doctorale :	Université Aix-Marseille / Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN

Les populations naturelles d'organismes aquatiques sont susceptibles d'être exposées à des radionucléides émetteurs de différents types de rayonnement ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). L'exposition d'un organisme aux radionucléides entraîne des effets qui dépendent de plusieurs facteurs tels que le type de rayonnement, sa répartition subcellulaire, la dose absorbée, mais également le temps d'exposition. La caractérisation subcellulaire de la distribution du radionucléide et de la dose qui y est associée est donc cruciale pour caractériser les mécanismes associés aux effets induits.

La toxicité des rayonnements beta sur les organismes est peu connue et ces questionnements s'intègrent dans la stratégie scientifique de l'IRSN afin de mieux caractériser les conséquences d'une exposition environnementale aux faibles doses. Les travaux déjà réalisés au LECO ont révélé des différences de mécanismes d'action des rayonnements émis par le tritium en fonction de sa forme (organique vs eau tritiée). Cette thèse a pour but de caractériser les effets, la répartition subcellulaire et la dose générée par le tritium (tritium organique ; thymidine tritiée) en (a) caractérisant la dose générée par les rayonnements beta à différentes échelles (organisme, ADN), (b) en reliant la dose aux effets observés sur les embryons et larves de poisson zèbre et (c) en comparant la toxicité du tritium sous forme organique à celle du tritium libre et à l'irradiation gamma ( $^{137}\text{Cs}$ ). Des œufs de poisson zèbre sont exposés à de la thymidine tritiée à des débits de dose allant de 50 à 550  $\mu\text{Gy} / \text{h}$  afin de déterminer les dynamiques d'internalisation dans les organismes et dans leur ADN puis d'étudier les effets délétères aux niveaux développementaux, immunologiques, musculaires et comportementaux. Les doses générées aux échelles cellulaires et nucléaires seront évaluées par des simulations numériques (collaboration des deux laboratoires de l'IRSN, le LEDI et le LECO).

Les expériences réalisées ont permis de déterminer que l'internalisation du tritium chez les embryons et larves de poisson zèbre évoluait de manière non linéaire avec l'activité présente dans l'eau. En effet, le débit de dose interne augmentait de façon exponentielle avant d'atteindre un plateau (1200 et 600  $\mu\text{Gy} / \text{h}$  respectivement pour les embryons et larves). Les simulations de microdosimétrie ont permis de mettre en avant une relation linéaire entre le rayon de la cellule cible et l'énergie qui y est déposée par les électrons issus de la dégradation du tritium. Par la suite, des simulations des dommages à l'ADN seront réalisées, et elles seront confrontées aux résultats expérimentaux à venir (internalisation du tritium dans l'ADN, mesure des effets).

## SUJET DE LA THÈSE

## Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants dans les zones d'exclusion de Tchernobyl et Fukushima

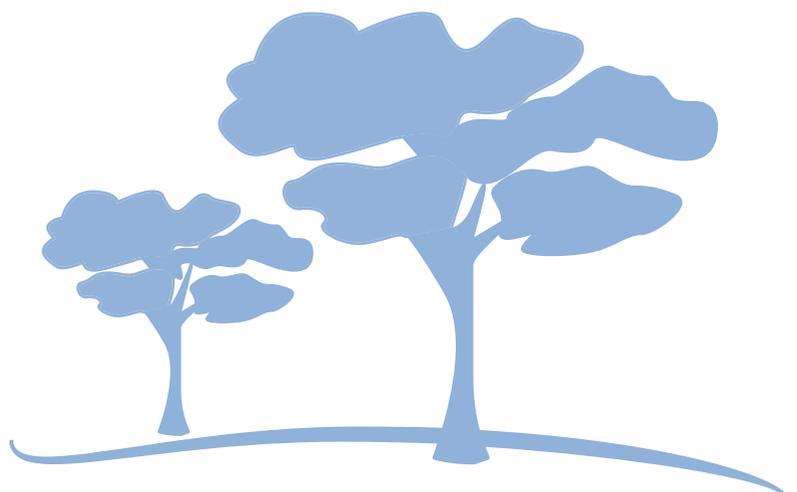
Doctorant :	Clément CAR
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Jean-Marc BONZOM / Olivier ARMANT
Directeur de thèse :	Patrick LALOI – IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement ED 251
Financement de thèse :	IRSN

Dès les premières semaines qui ont suivi un accident nucléaire majeur comme celui de Tchernobyl, des effets de la radio-contamination de l'environnement ont été observés sur la faune sauvage, en particulier dans des zones les plus contaminées. Cependant, les conséquences à long terme de cette radio-contamination – plusieurs années / générations après l'accident – et à faible dose restent encore mal comprises. La mise en place de zones d'exclusion (i.e. une réduction drastique de l'activité humaine) dans les régions les plus contaminées entraîne en parallèle l'émergence d'un milieu favorable à un grand nombre d'espèces. Néanmoins, cela ne permet pas de conclure sur une base scientifique établie à une absence d'effet des rayonnements ionisants. À long terme, l'intégration de potentiels effets individuels à l'échelle des populations peut impacter leur évolution et engendrer des modifications irréversibles. L'étude des conséquences d'une contamination radioactive chronique de l'environnement sur l'évolution des populations reste pour autant marginale. Ce projet de recherche doctoral se propose de revisiter ces conséquences sous un angle évolutif.

Une étude de la génétique de populations de rainettes vertes (*Hyla orientalis*) dans la région de Tchernobyl a été réalisée. L'analyse de marqueurs génétiques nous a permis de montrer l'existence d'une diversité génétique mitochondriale anormalement élevée dans la zone d'exclusion de Tchernobyl plus de 30 ans après l'accident (Car et al. 2021 : <https://doi.org/10.1111/eva.13282>). A l'aide de simulations de l'évolution de populations, nous concluons à une augmentation importante du taux de mutations mitochondriales. Nous montrons également que les variations génétiques observées ne peuvent être obtenues qu'avec des populations présentant un faible nombre d'individus, ce qui questionne l'existence d'effets délétères associés au fort taux de mutations.

Pour tester la généralisation des résultats obtenus, d'autres sites radio-contaminés et d'autres espèces sont étudiés. Ainsi, la génétique de populations de rainettes (*Dryophytes japonicus*) collectées en 2012 et 2013 dans la région de Fukushima a été analysée. Une mission de terrain à Fukushima prévue en 2022 permettra la comparaison 10 ans après cet accident.

Enfin, des échantillons de mésanges (*Parus major*) prélevés en 2018 dans la région de Tchernobyl nous ont permis d'étudier la génétique des populations de cette espèce en comparaison à d'autres populations européennes. L'étude d'un marqueur mitochondrial montre également chez cette espèce la présence d'une diversité génétique mitochondriale très élevée dans la zone d'exclusion de Tchernobyl. Si certains indices génétiques vont dans le sens d'une augmentation du taux de mutations, l'absence de modification du pattern évolutif indique en parallèle l'existence de migrations importantes. Une surmortalité des mésanges dans la zone d'exclusion peut-elle expliquer une augmentation des migrations en direction de cette zone ?



➤ Mardi 29 mars

09 h 50 - 11 h 15 Salle Riviera

## SESSION PARALLÈLE

### ➤ SANTÉ - MESURES BIOLOGIQUES ET RADIOTHÉRAPIE

**Président : Didier FRANCK**

Adjoint à la cheffe du Service de dosimétrie (PSE-SANTE / SDOS)

**Antonin DESCHEMPS** - Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologiques.

**Mohammed BENSIALI** - INDORI : Intégration des Incertitudes associées à la Dosimétrie personnalisée dans l'Optimisation des Radiothérapies Internes.

**Louis ERMENEUX** - Dosimétrie des systèmes IRM-Linac utilisés en radiothérapie externe : étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D.

**Alexandra WARTEL** - Activité humaine et performance transversale - Le cas de la préparation des traitements en radiothérapie externe.

## SUJET DE LA THÈSE

## Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologiques

---

Doctorant :	Antonin DESCHEMPS
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRAcc & Serpico (Inria)
Tuteur de thèse :	Mohamedamine BENADJAOUD
Directeur de thèse :	Mohamedamine BENADJAOUD (IRSN) / Charles KERVRANN (Inria)
École doctorale :	Université Rennes 1 / MathSTIC
Financement de thèse :	IRSN / Inria / AID (DGA)

---

Le *deep learning* moderne a montré des résultats prometteurs en imagerie biologique et médicale, principalement pour des tâches de classification, de segmentation et de détection. Notre but est d'obtenir des résultats similaires pour la détection d'aberrations chromosomiques dans des images de métaphase pour la dosimétrie biologique.

Pour le moment, le dénombrement de ces aberrations chromosomiques en imagerie cytogénétique GEMSA est effectué au sein du Laboratoire de radiobiologie des expositions accidentelle (LRAcc) selon une procédure manuelle. Les biologistes du laboratoire sont néanmoins aidés par un outil de détection semi-automatique implémenté par l'entreprise MetaSystems.

Le projet de thèse a pour objectif de proposer une analyse automatique précise et utilisable à large échelle (grands volumes de données). Pour cela, une approche naturelle est de détecter les objets chromosomiques d'intérêt, puis de les classer selon différentes catégories (monocentrique, dicentrique, fragment...).

L'étape de détection est résolue jusqu'à présent de façon relativement satisfaisante, même avec de petits volumes de données d'entraînement, avec des architectures d'apprentissage profond comme U-Net ou R-CNN.

En revanche, l'étape de classification est plus complexe : l'aspect des chromosomes dans les images peut varier très significativement, en fonction de plusieurs facteurs relatifs au dispositif d'acquisition des images, au moment de capture de l'image dans le processus de division cellulaire, aux conditions d'adhésion du colorant GEMSA au chromosomes, ou encore aux variations d'éclairage induites par la position de la cellule sur la lame. On constate fréquemment que certains objets visuellement très proches, appartiennent en fait à des classes différentes.

Par ailleurs, le problème de classification est aussi déséquilibré : les chromosomes monocentriques sont beaucoup plus nombreux que les chromosomes aberrants. Le *ratio* entre les deux classes dépend notamment de la dose reçue. Ce *ratio* étant absolument essentiel pour l'estimation de la dose, les stratégies habituelles de ré-échantillonnage (sur-échantillonnage de la classe minoritaire) ont pour mauvais goût de biaiser le classifieur et ainsi l'estimation de dose associée.

Pour contourner ce problème, une synthèse des instances chromosomiques réalisée *via* une représentation figurative et abstraite sous forme d'un « squelette » est proposée de façon à transférer le problème de classification vers un cadre mieux défini topologiquement.

Nous avons également expérimenté une approche globale (détection et classification) reposant sur de la régression d'images, qui permet un comptage direct *via* la prédiction d'une carte 2D de probabilité de présence des aberrations. Les premiers résultats avec cette approche sont prometteurs, tout particulièrement pour détecter des fragments. Ce modèle sera évalué prochainement de façon plus précise sur un grand nombre d'images.

## SUJET DE LA THÈSE

## INDORI : Intégration des Incertitudes associées à la Dosimétrie personnalisée dans l'Optimisation des Radiothérapies Internes

Doctorant :	Mohammed BENSIALI
Date du début de la thèse :	16 / 09 / 2019
Laboratoire :	PSE-SANTE / SDOS / LEDI
Tuteur de thèse :	Estelle DAVESNE / Stéphanie LAMART
Directeur de thèse :	Didier FRANCK
École doctorale :	Université Paris-Saclay / PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN

L'optimisation des traitements en radiothérapie interne vectorisée nécessite l'estimation des doses personnalisées évaluées à partir de la biocinétique du radiopharmaceutique spécifique à chaque patient. Pour cela, de nouveaux protocoles basés sur l'analyse d'images scintigraphiques, obtenues lors du suivi du patient, sont en cours de développement. Cependant, l'estimation de la dose absorbée à partir d'images est sujette à des incertitudes jugées comme importantes mais généralement non estimées.

Cette thèse vise à évaluer ces incertitudes et de les réduire à un niveau jugé acceptable via l'optimisation des protocoles de suivi. Ces incertitudes sont évaluées par l'application de méthodes statistiques bayésiennes parfaitement adaptées grâce leur souplesse et leur rapidité.

Dans ce cadre, un réseau bayésien a été développé en identifiant les relations entre les différentes grandeurs impliquées dans l'évaluation de la dose personnalisée à partir des images du patient. Ce réseau comporte quatre parties relatives : 1) au calcul de dose, 2) à l'estimation du volume, 3) à la détermination de la biocinétique, 4) au traitement des images. Dans un deuxième temps la structure du réseau en lien avec les pratiques cliniques a été validée en collaboration avec des experts du domaine et du monde hospitalier.

L'applicabilité du réseau a ensuite été testée en calculant la distribution de probabilité de la dose absorbée dans 6 lésions (métastases-thyroidiennes dans les poumons) à partir de données cliniques recueillies pour un patient traité à l'iode-131. Les informations sur les volumes des lésions et l'activité administrée au patient ont été fournies par l'hôpital, ainsi que 4 images planaires et une SPECT / CT. Celles-ci ont été analysées à l'aide du logiciel OEDIPE<sup>[1]</sup> afin de récupérer les données d'activité-temps pour chaque lésion. A partir de ces résultats, des distributions de probabilité réalistes ont été attribuées aux différentes sources d'incertitudes dans le réseau, sur la base de la littérature pour les incertitudes de volume<sup>[2]</sup>, de manipulations expérimentales à l'hôpital pour les incertitudes liées à l'appareil d'imagerie, et d'une étude inter-observateurs pour l'erreur de recalage manuel des images par différents opérateurs. Les doses moyennes obtenues par le réseau pour les 6 lésions ont enfin été comparées aux valeurs déterminées sans incertitude à partir des mêmes données. Les différences étaient inférieures à 7%. Avec un temps de calcul inférieur à 4 minutes, l'applicabilité clinique du réseau développé est démontrée. L'étape suivante consistera à comparer les distributions de probabilité des doses obtenues, à celles issues d'autres techniques disponibles dans la littérature<sup>[3]</sup>.

### Bibliographie

- [1] A. Petitguillaume, M. Bernardini, D. Broggio, C. De Labriolle Vaylet, D. Franck, and A. Desbreé, "OEDIPE, a software for personalized Monte Carlo dosimetry and treatment planning optimization in nuclear medicine: Absorbed dose and biologically effective dose considerations," *Radioprotection*, vol. 49, no. 4, pp. 275–281, 2014, doi: 10.1051 / radiopro / 2014021.
- [2] S. K. Vinod, M. G. Jameson, M. Min, and L. C. Holloway, "Uncertainties in volume delineation in radiation oncology: A systematic review and recommendations for future studies," *Radiother. Oncol.*, vol. 121, no. 2, pp. 169–179, 2016, doi: 10.1016 / j.radonc.2016.09.009.
- [3] J. I. Gear et al., "EANM practical guidance on uncertainty analysis for molecular radiotherapy absorbed dose calculations," *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, vol. 45, no. 13, pp. 2456–2474, 2018, doi: 10.1007 / s00259-018-4136-7.

## SUJET DE LA THÈSE

**Dosimétrie des systèmes IRM-LINAC utilisés en radiothérapie externe :  
étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D**

Doctorant :	Louis ERMENEUX
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-Santé / SDOS / LDRI
Tuteur de thèse :	Christelle HUET
Directeur de thèse :	Christelle HUET – IRSN Régine GSCHWIND – Université de Franche-Comté
École doctorale :	Université Paris Saclay / PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN

L'IRM-LINAC est un appareil de radiothérapie qui combine un accélérateur linéaire (LINAC) utilisé pour la production des rayons X et un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui offre de bons contrastes aux tissus mous permettant un meilleur suivi de la tumeur. Cependant des problématiques dosimétriques dues à la présence du champ magnétique statique de l'IRM ont été soulevées dans la littérature : elles concernent notamment l'étalonnage des faisceaux des IRM-LINAC et l'évaluation des doses par les systèmes de planification de traitement (TPS). Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de développer des outils dosimétriques et des protocoles robustes utilisables sur les IRM-LINAC afin d'améliorer la connaissance des doses délivrées aux patients traités avec ces appareils (question prioritaire n°5 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN). Le travail est réalisé en collaboration avec le centre de lutte contre le cancer Georges-François Leclerc (Dijon) qui dispose d'un IRM-LINAC, dont l'intensité du champ magnétique est égale à 0,35 T.

Dans un premier temps, trois types de films radiochromiques (EBT3, EBT-XD et OC-1) ont été caractérisés. Les films EBT3 ont montré une dispersion moins importante et une dynamique plus large dans la gamme de dose utilisée que les deux autres types et aucune variation significative de réponse n'a été observée pour des films exposés à des durées différentes en présence du champ magnétique.

Ensuite, plusieurs séries de mesures de facteurs d'ouverture du collimateur (FOC) ont été réalisées sur l'IRM-LINAC avec les films EBT3 et des détecteurs actifs (chambres d'ionisation, diodes et microdiamant). Un bon accord est observé entre les FOC mesurés et ceux calculés par le TPS pour les tailles de champ supérieures ou égales à 1,66 cm<sup>2</sup> pour l'ensemble des détecteurs investigués. En revanche, pour la taille de champ de 0,83 cm<sup>2</sup>, un écart de 5 % est obtenu entre la mesure par film et le TPS. Des simulations Monte Carlo sont en cours à l'aide du code Geant4. Elles ont pour objectif de fournir des valeurs de référence pour le FOC et d'étudier l'influence du champ magnétique sur le comportement des détecteurs actifs.

Enfin, des gels dosimétriques ont été fabriqués au laboratoire. La faisabilité de lire ces gels à l'aide de l'IRM est en cours d'investigation. Les premiers tests ont mis en évidence un effet de l'irradiation sur les temps de relaxation. Il s'agit à présent de caractériser la réponse des gels lorsqu'ils sont lus par IRM et d'établir un protocole robuste.

## SUJET DE LA THÈSE

**Activité humaine et performance transversale  
Le cas de la préparation des traitements en radiothérapie externe**

Doctorante :	Alexandra WARTEL
Date du début de la thèse :	14 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-EXP / SHOT / LSHS
Tuteur de thèse :	Céline PORET
Directeur de thèse :	Johann PETIT – Laboratoire IMS
École doctorale :	Université de Bordeaux / EDSP2
Financement de thèse :	IRSN

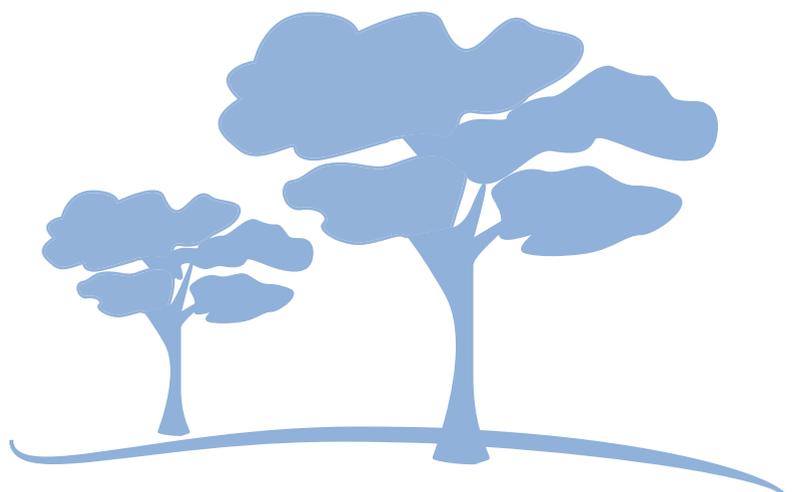
Cette thèse s'inscrit dans un projet de recherche du LSHS s'intéressant à la réalisation d'activités humaines au sein de configurations organisationnelles transversales. Ces configurations se caractérisent par la coordination d'activités locales destinées à produire en commun, de manière transverse, une ou plusieurs organisations, tout en maintenant les enjeux de sécurité.

Le processus de préparation du traitement des patients en radiothérapie externe constitue une telle organisation : les activités sont réalisées par différents professionnels, à des moments différents, et l'objectif de sécurité des patients doit être maintenu. Cette thèse est née du constat, fait par l'IRSN et l'ASN, que le « manque de fluidité » du processus peut impacter le travail des professionnels et la sécurité des patients. Nous cherchons à comprendre et à caractériser ces « manques de fluidité » au prisme des activités individuelles et collectives dans des organisations transversales.

Les premiers résultats avaient mis en évidence que les manques de fluidité pouvaient être considérés comme des « discontinuités » dans le processus. Nous avons montré que ces discontinuités sont parfois nécessaires pour maintenir l'objectif de sécurité des patients : certains types de discontinuités permettent au médecin d'anticiper la prise en charge d'un patient. Ils ne produisent pas uniquement des dysfonctionnements.

Nous faisons l'hypothèse que l'organisation de la préparation du soin, plus précisément, le fait de définir la date de la première séance dès le début du processus ou après la réalisation des différentes étapes, a des effets sur la fluidité et sur la sécurité des soins. Nous avons sélectionné deux établissements répondant à cette caractéristique, un CLCC qui définit cette date très tôt et un autre qui la définit au fil de l'eau, afin de comparer ces deux modes d'organisation pour caractériser les discontinuités et leurs effets sur la sécurité des soins.

Nous sommes actuellement dans une phase de recueil de données précises, décomposé en deux temps. Dans le premier temps, nous avons observé le travail réel des professionnels du premier CLCC pour préciser la problématique et la méthodologie. Cette méthodologie propose d'articuler deux niveaux d'analyse : celui du processus de préparation des traitements - de la planification à la première séance de traitement - pour des parcours sein et prostate; et celui de la journée pour chaque métier. Le deuxième temps consiste à tester la méthodologie sur le premier terrain puis, lorsqu'elle sera stabilisée, la mettre en œuvre sur le second.



➤ Mardi 29 mars

09 h 50 - 10 h 45 Salle Kandinsky

#### SESSION PARALLÈLE

➤ **SÛRETÉ - COMPORTEMENT DU BÉTON (VIEILLISSEMENT, SÉISME)**

**Président : Gauzelin BARBIER**

Responsable d'axe programme PSN-RES

**Joe MAALOUF** - Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI).

**Maryam TRAD** - Une nouvelle stratégie de modélisation enrichie pour l'interface acier-béton dans le contexte des éléments de plaques multicouches : application à l'évaluation des spectres de plancher.

**Julien CLEMENT** - Caractérisation *in situ* de l'interaction sol-structure dynamique, au travers de la mesure de la fonction d'impédance.

SUJET DE LA THÈSE

Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI)

Docteurant :	Joe MAALOUF
Date du début de la thèse :	12 / 11 / 2020
Laboratoire :	LMDC & PSN-EXP / SES / LMAPS
Tuteur de thèse :	Jacques JABBOUR - IRSN
Directeur de thèse :	Stéphane MULTON - LMDC
École doctorale :	Université Toulouse III / MEGEP
Financement de thèse :	IRSN

---

Les Réactions de Gonflement Interne (RGIs) sont des pathologies endogènes qui provoquent la mise en traction de la matrice cimentaire du béton conduisant à la création de fissures dans le matériau et dans les ouvrages atteints. Dans la littérature, la plupart des études portant sur les bétons atteints de RGIs s'intéressent à l'évolution des propriétés mécaniques, mais peu s'intéressent aux propriétés de transfert. Bien que ces réactions conduisent à une diminution des résistances mécaniques des bétons, elles ne remettent pas nécessairement en cause la stabilité des ouvrages. Toutefois, La fissuration induite impacte naturellement la durabilité du matériau. Les propriétés de transport du béton jouent un rôle clé dans la prévision de la durabilité des structures en béton armé. La quantification de l'impact des RGIs sur la perméabilité au gaz du béton est nécessaire dans le cas des ouvrages qui doivent assurer une fonction de confinement. L'objectif de cette étude expérimentale est de mesurer l'évolution de la perméabilité à l'air avec Le développement de RGIs, pour différents niveaux d'expansion et divers degrés de saturation du béton. Dans ce travail, deux RGIs ont été étudiées : La réaction alcali-granulat (RAG) pour laquelle l'origine des gonflements se trouve dans les granulats et la réaction sulfatique interne (RSI) dont l'origine est située dans la matrice cimentaire.

Pour répondre à ces objectifs, cette thèse s'articule autour de trois axes :

- Le premier axe se focalise sur les mesures de perméabilité des bétons non armés atteints par les réactions de gonflement interne (première année) ;
- Le deuxième axe étudie l'ajout d'armatures de manière à quantifier l'évolution de la perméabilité à l'air des bétons armés uniquement associée à l'insertion des armatures et à la variation du taux de saturation (deuxième année) ;
- Le troisième axe consiste à coupler à La fois l'effet des armatures avec la dégradation du béton par le développement des RGIs dans le but de quantifier les modifications de la perméabilité au gaz pour différents taux de saturation (troisième année).

Les premiers résultats obtenus montrent que le développement des RGIs et des fissures induites entraîne une augmentation de la perméabilité à l'air du béton en particulier dans les bétons fortement saturés. L'évolution des paramètres de la loi de Klinkenberg en fonction des expansions mesurées est également évaluée dans ce travail. Les données de cette étude permettent de proposer des lois d'évolution des propriétés de transfert en fonction de l'expansion générée et du degré de saturation du béton.

## SUJET DE LA THÈSE

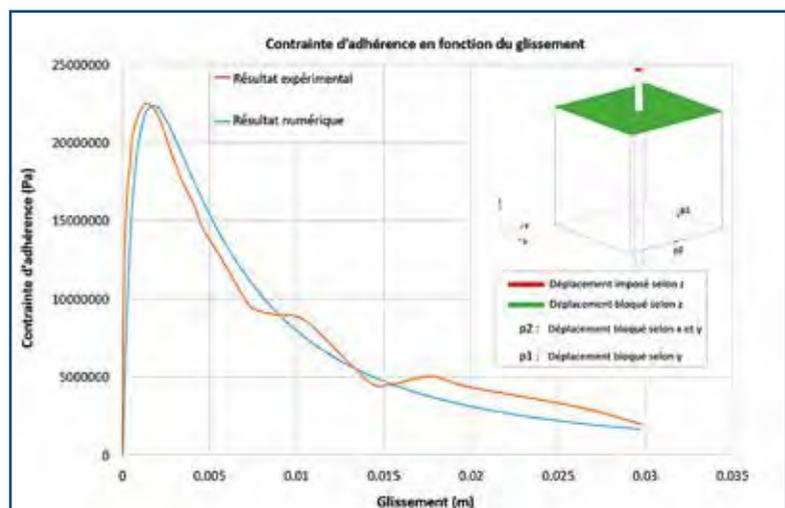
## Une nouvelle stratégie de modélisation enrichie pour l'interface acier-béton dans le contexte des éléments de plaques multicouches : application à l'évaluation des spectres de plancher

Doctorante :	Maryam TRAD
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Tuteur de thèse (IRSN) :	Ibrahim BITAR
Co-directeur de thèse (IRSN) :	Benjamin RICHARD - IRSN
Directeur de thèse :	Stéphane GRANGE – INSA Lyon
École doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Pour certains ouvrages de génie civil nucléaire en béton armé, la caractérisation mécanique de leur comportement constitue un défi majeur afin d'évaluer de manière réaliste les mouvements transférés depuis le sol vers les équipements en cas de séisme. Afin d'assurer une meilleure robustesse des approches utilisées dans la modélisation des structures en béton armé, il est nécessaire de prendre en compte les différentes sources de dissipation d'énergie, en particulier l'interaction entre le béton et les armatures en acier. Plusieurs lois sont proposées dans la littérature pour décrire le comportement de l'interface acier / béton. Ces lois sont souvent intégrées dans des analyses fines et détaillées. Une mise en œuvre à l'échelle d'un ouvrage industriel reste encore fastidieuse.

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'améliorer la manière dont est prise en compte la dissipation d'énergie au niveau de l'interface acier / béton dans le cadre de la méthode aux éléments finis. Cette thèse répond aux enjeux de sûreté qui relèvent de la mission de l'IRSN, puisqu'elle vise, d'une part, à apporter des éléments sur la capacité des modèles numériques avancés à prédire des comportements ou des modes de ruine et, d'autre part, à évaluer l'effet des non-linéarités de comportement sur les spectres de plancher.

Dans nos travaux, il est proposé de relier les nœuds d'acier et de béton par des relations cinématiques. Cette approche sera appliquée aux cas des éléments poutres Timoshenko ou plaques de Reissner / Mindlin. Afin de valider la méthodologie, la première étape consiste à étudier des exemples unidirectionnels de ressorts avec des nœuds reliés par des relations cinématiques. Dans un deuxième temps, une étude numérique est menée sur un essai pull-out calibré par rapport à des résultats expérimentaux issus de la littérature<sup>[1]</sup>. Le but de cette modélisation est de construire l'expression analytique de la relation cinématique à imposer aux nœuds de l'interface. Il est ensuite prévu d'effectuer une série de modélisations *pull-out* pour étudier l'influence des différentes propriétés matérielles et géométriques sur la forme de la relation considérée.



[1] A. Torre-Casanova, "Prise en compte de la liaison acier-béton pour le calcul de structures industrielles", *École normale supérieure de Cachan*, 2012.

## SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation *in situ* de l'interaction sol-structure dynamique,  
au travers de la mesure de la fonction d'impédance

Doctorant :	Julien CLEMENT
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Tuteur de thèse (IRSN) :	Maria LANCIERI (PSE-ENV / SCAN / BERSSIN)
Co-directeur de thèse (IRSN) :	Benjamin RICHARD (PSN-EXP / SES / LMAPS)
Directeur de thèse :	Jean-François SEMBLAT - ENSTA PARIS
École doctorale :	Institut Polytechnique de PARIS
Financement de thèse :	IRSN / EDF / CEA (GGP/MSS)

Lorsqu'un séisme se produit, l'énergie associée à la rupture sur le plan de faille se propage depuis la source sismique localisée en profondeur jusqu'à la surface du sol sous forme d'ondes élastiques. A la surface libre (interface sol-air), les ondes sismiques sont en partie réfléchies et en partie converties en ondes de surface. La présence d'un ouvrage a un impact sur le comportement des ondes par l'effet de l'interaction mutuelle entre ce dernier et le sol sous sa fondation : une partie des ondes transmet de l'énergie à la fondation qui entre en mouvement à son tour et renvoie donc des ondes dans le sol. Ce phénomène est « l'Interaction Sol-Structure (ISS) ». Caractériser l'ISS est une étape fondamentale pour évaluer le comportement d'un bâtiment sous sollicitation sismique.

La caractérisation empirique de l'ISS s'avère peu réaliste (trop onéreuse étant donné les dimensions du bâti courant). Aussi, au cours des réévaluations périodiques de sûreté, l'ISS est systématiquement évaluée par des simulations numériques. La méthode de calcul employée le plus couramment par l'ingénierie consiste à établir des fonctions d'impédance (FI) représentatives du comportement dynamique de l'interface entre le sol et la structure. Toutefois, cette méthode s'appuie sur de nombreuses hypothèses simplificatrices. A cet égard, il serait pertinent de disposer de données provenant d'un essai *in situ* permettant de vérifier, sur un cas simple, si la méthode des FI, donne des résultats cohérent avec la mesure.

L'un des objectifs de la thèse est de développer un dispositif expérimental permettant de mesurer la relation effort-déplacement à l'interface d'une fondation rigide avec le sol. Le dispositif envisagé est piloté en effort par l'intermédiaire de pots vibrant électromécaniques générant des forces sinusoïdales à fréquence constante. La maîtrise des sollicitations appliquées à la fondation couplée à la mesure du mouvement de cette dernière par capteurs de vitesse permet, en établissant au préalable l'équation constitutive du système, de connaître la relation effort déplacement à l'interface sol-fondation et ainsi de caractériser l'ISS. Afin de mettre à l'épreuve ce dispositif, des essais du protocole seront réalisés sur une dalle de 3x3 m<sup>2</sup> dont on « mesurera » les FI. Les essais se dérouleront sur la plateforme européenne EuroSeisTest à Thessaloniki en Grèce, l'objectif final de ce projet de thèse étant d'éprouver la faisabilité d'un tel dispositif.

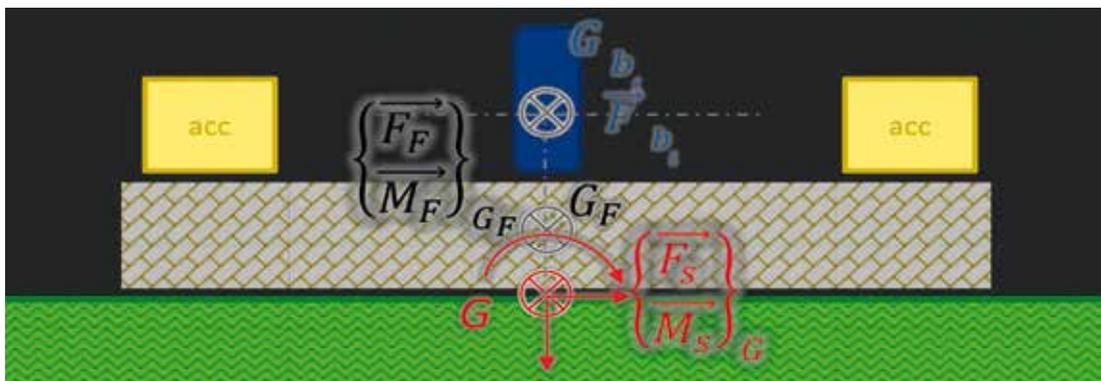


Schéma principe du système mécanique du système expérimental de mesure des fonctions d'impédance avec les torseurs d'efforts associés.

## ➤ Mardi 29 mars

11 h 00 - 12 h 00 Salle Klee

### SESSION POSTERS

Voir pages 109 à 140 les résumés des thèses des doctorants de première année.

13 h 45 - 15 h 10 Salle Kandinsky

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SÛRETÉ - ÉPURATION - FILTRATION DES EFFLUENTS GAZEUX RADIOACTIFS

**Président : Laurent CANTREL**

Chef du Laboratoire d'expérimentation, environnement et chimie (PSN-RES / SEREX / L2EC)

**Mohamad FARHAT** - Étude expérimentale de l'hydrodynamique du barbotage pour différents régimes : applications au piégeage des iodes en situations de FCVS et RTGV.

**Marie LECOQ** - Étude du comportement dynamique d'un filtre constitué d'un medium métallique en présence d'eau.

**Julie NGUYEN SADASSIVAME** - Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants de type Metal-Organic Framework (MOF).

**Aurélien RIOT** - La rétention du tritium dans l'installation ITER : du suivi de l'inventaire à l'évaluation du terme source en situations accidentelles.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale de l'hydrodynamique du barbotage pour différents régimes : applications au piégeage des iodes en situations de FCVS et RTGV

---

Doctorant :	Mohamad FARHAT
Date du début de la thèse :	07 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN – IUSTI Marseille
École doctorale :	Aix-Marseille Université / ED353: Sciences pour l'ingénieur
Financement de thèse :	IRSN / région PACA / EDF

---

Pool scrubbing is a filtration mechanism that aims to mitigate the release of fission products in different accident scenarios, notably in cases where it is implemented in Filtered Containment Venting System (FCVS), as an accident management device. It can also be induced in cases of steam generator tube rupture (SGTR) accident.

The venting of the carrier gas through a pool of water leads to the formation of bubbles. Then, during their rising and residence in the liquid phase, fission products can be transferred from gaseous to liquid phase, depending on a set of physical and chemical processes. Thus, this work aims to characterize the bubbles hydrodynamics and iodine retention mechanisms (CsI aerosol, volatile I<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub>I) upon injecting carrier gas from a submerged orifice, for different flow conditions. This contributes to IRSN research process dealing with the efficiency of mitigation or filtration systems implemented on LWRs (S1).

Experimental work was carried out to characterize bubble hydrodynamics in the injection zone, such as frequency, shape, volume, surface area, velocity, and void fraction. Different morphologies of bubbles have been observed, allowing to classify different bubbling regimes and transitions from bubbling to jetting, according to the Weber number (We). Thus, a phenomenological approach of characterizing bubble sizes in the injection zone (globule formation) has been provided, which seems more accurate than classical approaches implemented in literature models.

Moreover, experiments coupling hydrodynamics and retention measurements were performed for different experimental conditions on the TYFON facility in Cadarache. The dependency of iodine retention on different parameters has been investigated, by determining the decontamination factor (DF).

For the retention of CsI aerosols, the influence of parameters such as flowrate (Weber number), pH, pool and gas temperatures, submergence has been studied. The main trend observed is that the DF variation vs Weber number may present a minimum. Beyond this minimum, residence time and gravitational settling effects dominate and above it, effects linked to jetting regime (large surface exchange, impaction) dominate. Otherwise, a weak retention of gaseous organic CH<sub>3</sub>I is observed whatever the test configuration, even if a slight increase in CH<sub>3</sub>I trapping seems to depend on kinetics prompted by the bath chemistry and temperature.

Through the current year, retention tests on gaseous iodine I<sub>2</sub> will be performed, as well as complementary coupling tests useful for better understanding the phenomena. Finally, all these results are intended for the qualification and validation of the implemented pool scrubbing models in the ASTEC code.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude du comportement dynamique d'un filtre constitué d'un medium métallique en présence d'eau

Doctorante :	Marie LECOQ
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LECEV
Tuteur de thèse :	Soleiman BOURROUS
Directeur de thèse :	Dominique THOMAS - LRGP
École doctorale :	Université de Lorraine / SIRENA
Financement de thèse :	IRSN / Novintec

Dans les réseaux de ventilation, l'utilisation de préfiltres métalliques est envisagée pour protéger les filtres à très haute efficacité (faits de fibres de verre) d'un éventuel rejet de liquide sous forme de gouttelettes en suspension (aérosol liquide) susceptible d'affecter leur intégrité à travers un colmatage excessif et une résistance mécanique altérée. La filtration d'aérosol liquide a fait l'objet de nombreuses études notamment sur les filtres en fibres de verre, cellulose ou polymère, mettant en évidence les principes généraux du colmatage. Toutefois, peu d'études ont conduit à l'élaboration d'un modèle applicable aux filtres faits de fibres métalliques. Ceci est dû aux nombreux paramètres influençant la filtration (caractéristiques du liquide et du filtre, vitesse de filtration...) mais aussi surtout aux grandeurs propres à l'interaction fibre liquide (angle de contact notamment).

Les filtres métalliques se caractérisent par leur compacité, diamètre de fibre et épaisseur. En outre, ils sont composés de plusieurs couches de média ayant des caractéristiques différentes (figure 1). Cette structure vise à favoriser le drainage du liquide. Ceci permet de réduire le bullage, principal responsable du réentraînement de polluant et de limiter la formation de film liquide, contribution principale à l'augmentation de perte de charge du filtre.

La première partie de cette thèse a porté sur l'étude de l'impact des propriétés structurales du medium sur son comportement dynamique, en particulier sur les masses de liquide accumulé et les résistances aérauliques associées. La seconde partie se focalise sur l'impact des propriétés physico-chimiques du liquide constitutif des gouttes (viscosité, tension de surface). Pour ce faire, des essais ont été réalisés avec des résines thermodurcissables afin de mesurer la distribution de liquide dans le matelas fibreux grâce à des méthodes de micro-tomographie X.

La masse de liquide accumulé dans le filtre diminue significativement avec l'ajout de couches de filtres et donc de couches de drainage. La résistance aéraulique diminue avec l'augmentation de la vitesse de filtration sans pour autant affecter la masse de liquide retenue. Cela indique une distribution de liquide observable à travers les mesures faites par micro-tomographie X différente. Cette cinétique sera liée à la granulométrie des fibres, à l'épaisseur du medium et aux propriétés physicochimiques du liquide.

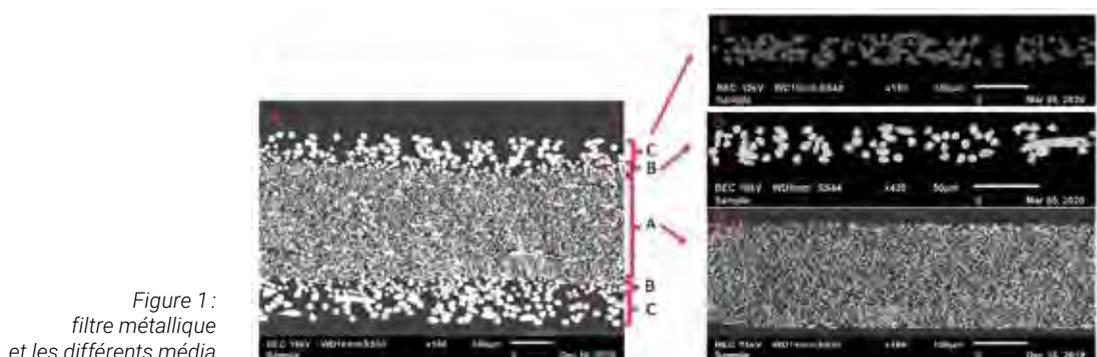


Figure 1 :  
filtre métallique  
et les différents média

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares  
par des matériaux poreux innovants de type Metal-Organic Framework (MOF)**

Doctorante :	Julie NGUYEN SADASSIVAME
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Christophe VOLKRINGER - UCCS
École doctorale :	Centrale Lille / SMRE
Financement de thèse :	IRSN / NUZIA

Dans un réacteur nucléaire, des gaz rares tels que le xénon et le krypton sont produits par les réactions de fission au sein du combustible nucléaire. En situations accidentelles, ces rejets de gaz peuvent produire des doses radioactives significatives à court et moyen termes notamment pour les opérateurs sur site. En effet, certains isotopes radioactifs ont une période de demi-vie pouvant aller jusqu'à quelques années (10,8 ans pour le  $^{85}\text{Kr}$  et 5,3 jours pour le  $^{133}\text{Xe}$ ). Très peu réactifs chimiquement et très volatils, ces gaz sont difficilement piégeables et séparables.

Jusqu'à récemment, le piégeage de ces gaz rares n'avait jamais été réellement instruit car seules des méthodes complexes et difficiles à mettre en œuvre en industrie existaient. Or, depuis plus d'une décennie, de nouveaux matériaux poreux nommés MOFs (Metal-Organic Frameworks) ont démontré des capacités de piégeage efficaces vis-à-vis de gaz stratégiques comme le  $\text{CO}_2$ . En effet, ces matériaux hybrides métal-ligand, organisés en réseau, sont modulables à souhait avec des diamètres de pores très variables et une grande surface spécifique (jusqu'à  $7000 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Ils possèdent également une fonctionnalisation illimitée liée à la partie organique, qui peut favoriser l'adsorption sélective des gaz.

L'objectif de la thèse est d'étudier la faisabilité de piégeage des gaz rares (Xe et Kr) par des matériaux poreux de type MOF.

Ce travail de thèse consiste d'une part à la synthèse et caractérisation des MOFs (surface spécifique BET, DRX, MEB-EDX) ainsi qu'à l'estimation de leurs capacités de piégeage des gaz rares en condition statique. Ces matériaux, synthétisés à l'UCCS (Unité de catalyse et de chimie du solide, Lille), sont sélectionnés selon différents critères tels que leurs fonctionnalisations, notamment par l'insertion de particules métalliques telles que l'argent au sein des pores (dopage), susceptibles d'optimiser la capture des gaz rares. D'autre part, l'efficacité de piégeage de ces gaz au sein des MOFs sélectionnés est évaluée en condition dynamique sur le banc expérimental SAFARI de l'IRSN, permettant de reproduire différents paramètres représentatifs d'un accident grave susceptible de survenir sur un REP (température, humidité, vitesse de passage, concentration). Le flux de gaz injecté au travers du matériau est analysé en ligne par chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS), afin de déterminer le temps de percée et donc le facteur de décontamination propre au matériau.

## SUJET DE LA THÈSE

**La rétention du tritium dans l'installation ITER :  
du suivi de l'inventaire à l'évaluation du terme source en situations accidentelles**

---

Doctorant :	Aurélien RIOT
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	François VIROT
Directeur de thèse :	Damien CONNETABLE - CIRIMAT
École doctorale :	Université Paul Sabatier Toulouse III – Science de la Matière
Financement de thèse :	IRSN – Eurofusion

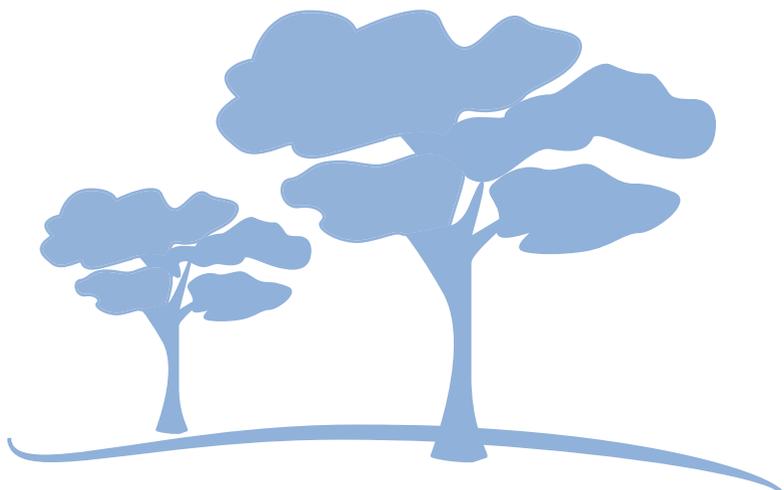
---

L'installation ITER a pour finalité de démontrer la maîtrise de la production d'énergie par fusion thermonucléaire à partir d'un plasma de tritium-deutérium confiné par un champ magnétique dans une chambre à vide. Pour la première paroi de la chambre à vide, le matériau utilisé est le béryllium. Du point de vue de l'analyse de sûreté, il est nécessaire d'étudier les interactions entre les isotopes de l'hydrogène (HI) et le béryllium pour pouvoir évaluer l'efficacité des méthodes mises en place par l'exploitant afin de quantifier l'inventaire en tritium dans la chambre et d'évaluer la désorption du tritium lors de l'étuvage de la première paroi afin de minimiser les rejets dans l'environnement en cas de perte de confinement de la chambre à vide.

L'objectif du travail de thèse est d'étudier l'interaction des HI avec les défauts complexes du béryllium, qui pour certains, sont susceptibles de piéger une grande quantité de tritium. Les défauts retenus pour cette thèse sont les joints de grains et l'oxyde de béryllium (BeO), dans lesquels l'insertion, la ségrégation et la diffusion des HI sont étudiées.

Après un bref rappel des résultats de l'étude des sites d'insertion pour  $H^0$ ,  $H^+$ ,  $H^-$  et  $H_2$ , les dernières avancées dans l'établissement des coefficients de diffusion des HI dans BeO seront présentées. Tout d'abord, les chemins de migration pour chaque espèce ont été étudiés afin d'identifier les états de transition nécessaires aux calculs des probabilités de saut. Des expressions analytiques des coefficients de diffusion ont été établies hormis pour  $H^+$ . Pour ce dernier, nos travaux ont mis en évidence un mécanisme de diffusion complexe que l'on a analysé à l'aide de la méthode de Monte-Carlo cinétique. Enfin, l'accord entre nos coefficients et les données expérimentales disponibles sur le BeO monocristallin sera discuté.

Dans un second temps, les premières investigations menées sur les joints de grains seront présentées. L'énergie d'interface d'un bicristal est calculée en fonction de l'angle de rotation des grains, de la translation dans le plan de joint ainsi que celle normale au plan. Ainsi pour plusieurs axes de rotation, le paysage énergétique est cartographié afin d'identifier les joints de grain les plus stables. Un premier cas de joint de flexion symétrique dans le béryllium sera présenté. La démarche générale jusqu'à l'étude en DFT de la ségrégation des HI dans les défauts interfaciaux des bicristaux sera illustrée à l'aide d'un exemple.



## ➤ Mardi 29 mars

13 h 45 - 14 h 50 Salle Renoir / Matisse

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ENVIRONNEMENT - MESURE DES RADIONUCLÉIDES

**Président : Denis MARO**

Chef du Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (PSE-ENV / SRTE / LRC)

**Paul MALFRAIT** - Démélange spectral parcimonieux par fusion de données spatiale et / ou temporelle pour la détection rapide d'événements radiologiques par spectrométrie gamma.

**Coralie CARRIER** - Développement de nouvelles méthodes d'analyse de l'iode 129 à bas niveau appliquées à la compréhension des mécanismes de transfert de l'iode dans l'environnement.

**Anaëlle MAGRE** - Détermination du rapport isotopique  $^{135}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$  dans des échantillons de l'environnement à très bas niveau de radioactivité. Utilisation de ce nouveau traceur pour identifier les sources de césium dans l'environnement.

## SUJET DE LA THÈSE

**Démélange spectral parcimonieux par fusion de données spatiale et / ou temporelle pour la détection rapide d'événements radiologiques par spectrométrie gamma**

Doctorant :	Paul MALFRAIT
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV / SAME / LMRE
Tuteur de thèse :	Anne de VISMES OTT
Directeur de thèse :	Jérôme BOBIN, CEA
École doctorale :	Université Paris Saclay / STIC
Financement de thèse :	IRSN

Le Laboratoire de Métrologie de la Radioactivité de l'Environnement (LMRE) améliore continuellement les techniques de mesure pour identifier et quantifier les radionucléides présents à l'état de trace dans l'environnement. En proposant de nouvelles approches en spectrométrie gamma nous répondons à la volonté de l'IRSN de développer des outils d'analyse plus sensibles et plus rapides.

Le spectre gamma obtenu lors de la mesure d'un échantillon comprenant plusieurs radionucléides est la combinaison linéaire des signatures spectrales de ces radionucléides, ajoutée à un bruit de fond. La signature d'un radionucléide est l'histogramme des dépôts d'énergie dans le détecteur laissés par les photons émis lors de la désintégration de ce radionucléide. Le but de l'algorithme de démélange spectral est d'estimer les contributions de chaque radionucléide.

Ma thèse s'appuie sur les travaux de thèse de Jiaxin Xu qui a proposé une méthode de démélange utilisant l'ensemble de l'information contenue dans le spectre (pics et fonds continus associés) plutôt que les seuls pics. Mes travaux portent sur la généralisation de cet algorithme pour l'analyse conjointe de plusieurs spectres gamma afin d'utiliser l'information temporelle et / ou spatiale dans le but d'améliorer l'efficacité du démélange spectral.

Dans un premier temps, nous avons étudié des mesures successives d'un même échantillon ce qui nous permet d'exploiter l'information de la décroissance des radionucléides pour abaisser les seuils de décision et obtenir une estimation précoce de l'activité des radionucléides d'intérêt. Le passage en analyse temporelle permet de réduire le temps de décroissance habituellement observé pour que les radionucléides à vie courte disparaissent. Dans notre algorithme ceux-ci sont estimés tôt et leurs contributions sont donc simplifiées dans le modèle pour se focaliser sur les radionucléides à vie longue et à très faible activité, e.g.  $^{137}\text{Cs}$ .

Dans un second temps, nous allons nous pencher sur les données issues d'une mesure réalisée avec une électronique en mode liste permettant de reconstruire des spectres de durée choisie et de simuler une analyse, et donc une estimation des activités, en ligne. Nous pourrions ainsi aller plus loin dans l'analyse des corrélations temporelles des spectres, tout en devant résoudre les problèmes d'implémentation et de statistique puisque nos analyses devront tenir compte du grand débit d'information en début de mesure et des très faibles activités que l'on cherche à détecter.

Parallèlement, nous étudions la variabilité des signatures spectrales utilisées dans l'algorithme de démélange et travaillons au développement d'une méthode pour la résolution conjointe de problèmes de démélange spectral et d'estimation des signatures spectrales.

## SUJET DE LA THÈSE

## Développement de nouvelles méthodes d'analyse de l'iode 129 à bas niveau appliquées à la compréhension des mécanismes de transfert de l'iode dans l'environnement

Doctorante :	Coralie CARRIER
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SAME / LERCA
Tuteur de thèse :	Azza HABIBI
Directeur de thèse :	Lucilla BENEDETTI - CEREGE
Co-directeur de thèse :	Denis MARO- IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN

La dispersion des isotopes radioactifs de l'iode dans l'environnement, dans le cas de rejets accidentels ou de rejets autorisés, est une problématique majeure du fait de leur potentiel impact sanitaire. En effet, l'iode peut se concentrer dans la glande thyroïdienne des mammifères et en particulier de l'homme.  $^{129}\text{I}$  étant rejeté de façon chronique et contrôlée par les usines de retraitement du combustible usé dans l'environnement marin et dans l'atmosphère, il peut être réémis du compartiment marin vers le littoral par émission de gaz ou d'aérosol. L'objectif de cette thèse est donc de développer une nouvelle méthode d'analyse de l'iode 129 dans le but d'évaluer la réémission de l'iode du compartiment marin vers le littoral par émission de gaz ou d'aérosol.

Pour cela, deux préleveurs automatiques ont été installés sur la Plateforme Technique IRSN La Hague (PTILH). Ils sont tous les deux reliés à un compteur proportionnel afin de mesurer  $^{85}\text{Kr}$  en temps réel. Cet isotope est rejeté en même temps que  $^{129}\text{I}$  par l'usine Orano La Hague. Quand  $^{85}\text{Kr}$  est détecté, l'iode 129 prélevé provient directement de l'usine. Au contraire, quand  $^{85}\text{Kr}$  n'est plus détecté, l'iode prélevé provient principalement de l'environnement marin. Les préleveurs automatiques sont composés de filtres pour piéger les aérosols, et de charbons pour piéger l'iode gazeux. Ils ont été sélectionnés après différents essais afin d'être compatibles avec la méthode d'analyse. Celle-ci est basée sur une quantification par ICP-MS et devra permettre la mesure de  $^{129}\text{I}$  et  $^{129}\text{I} / ^{127}\text{I}$  dans ces matrices complexes.

Les difficultés lors de l'analyse de l'iode sont dues à son extrême volatilité et ses multiples degrés d'oxydation. Ces caractéristiques pouvant induire des interférences non-spectrales comme les effets mémoires ou matrices, un milieu optimal de mesure a été développé pour s'en affranchir.

Ensuite, l'extraction par minéralisation acide a été développée et optimisée grâce à un plan d'expérience. Celle-ci est suivie par une purification par extraction en phase solide, développée et adaptée à une mesure directe par ICP-MS.

Enfin, l'ICP-MS pouvant présenter des interférents spectraux, l'interférence isobarique due au  $^{129}\text{Xe}^+$ , présent comme impureté dans l'argon, a été éliminé grâce à un gaz de collision / réaction.

La nouvelle méthode mise en place permet donc la mesure de l'iode 129 en direct ou après un traitement chimique. La limite de détection a été estimée à 8 mBq.L<sup>-1</sup> et à 0,15 mBq.L<sup>-1</sup> après traitement chimique, ce qui est 100 fois inférieur à celle de la spectrométrie gamma.

## SUJET DE LA THÈSE

**Détermination du rapport isotopique  $^{135}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$  dans des échantillons de l'environnement à très bas niveau de radioactivité. Utilisation de ce nouveau traceur pour identifier les sources de césium dans l'environnement**

Doctorante :	Anaëlle MAGRE
Date du début de la thèse :	23 / 09 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SAME / LMRE
Tuteur de thèse :	Béatrice BOULET
Directeur de thèse :	Laurent POURCELOT – IRSN
Co-directeur de thèse :	Matthieu ROY-BARMAN – LSCE
École doctorale :	Université Paris-Saclay / ED Sciences de l'environnement d'Ile-de-France
Financement de thèse :	IRSN

De multiples sources de radiocésium ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ) contribuent à la contamination radioactive de l'environnement (e.g. essais atmosphériques d'armes nucléaires, accidents nucléaires et rejets autorisés des installations nucléaires). Pour identifier et caractériser ces sources, la signature isotopique des radioéléments est un outil analytique couramment utilisé. Dans ce contexte, l'isotopie du césium a été étudiée en mesurant le rapport isotopique  $^{135}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$  dans des échantillons de l'environnement hautement contaminés (principalement collectés dans les zones d'exclusion de Tchernobyl et de Fukushima). En revanche, peu de données, dont aucune en France, sont disponibles à des niveaux environnementaux ( $< 1\ 000\ \text{Bq.kg}^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$ ). Pour cause, de nombreux interférents de mesure sont présents à des niveaux significatifs dans la gamme de masse d'intérêt par rapport à la faible quantité de radiocésium. Pour atteindre de bas niveaux, une très grande prise d'essai d'échantillon (jusqu'à une centaine de gramme) doit donc être traitée impliquant ainsi la mise en œuvre d'une radiochimie complexe.

La première partie de ce travail de thèse visait à développer un protocole radiochimique très spécifique pour le césium permettant d'atteindre les faibles niveaux de radioactivité artificielle observés dans l'environnement français ( $< 30\ \text{Bq.kg}^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$ ). La seconde partie est dédiée à la validation et l'application du protocole en analysant, d'une part, des échantillons de l'environnement provenant des zones d'exclusion de Tchernobyl et Fukushima puis, d'autre part, des échantillons de sol et de sédiment prélevés en France.

La stratégie adoptée pour le développement de cette nouvelle analyse a été d'étudier chacune des étapes du protocole en les adaptant à la très grande prise d'essai nécessaire. Un premier travail d'adaptation de la mise en solution de l'échantillon a permis une libération totale du radiocésium de la matrice environnementale. Les atomes de césium sont ensuite sélectivement concentrés grâce à une méthode utilisant la molécule de molybdophosphate d'ammonium (AMP). Enfin, le césium est séparé de ses interférents par une série de résine d'extraction avant la mesure par spectrométrie de masse (ICP-MS / MS).

Les performances chimiques du protocole développé sont très satisfaisantes : les rendements de récupération en  $^{137}\text{Cs}$ , mesurés par spectrométrie gamma, sont supérieurs à 80% et les facteurs de décontamination des interférents rendent négligeables leurs contributions aux masses d'intérêt. Concernant la mesure par ICP-MS / MS, l'optimisation des conditions de gaz de réaction (nature, proportion, débit) a permis d'obtenir une sensibilité maximale du signal ( $1.10^5\ \text{cps} / \text{ppb}$  de Cs) tout en éliminant les dernières traces d'interférents. Des premières valeurs de rapport isotopique  $^{135}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$  ont été déterminées lors de l'analyse d'échantillons de sédiment de lac provenant du massif du Mercantour. En accord avec la littérature, ces premiers résultats témoignent de la mixité des sources de contamination radioactive dans l'environnement français. La suite de ce travail visera donc à distinguer la contribution des retombées provenant des essais atmosphériques d'armes nucléaires de celles provenant de l'accident de Tchernobyl.

➤ Mardi 29 mars

15h30 - 16h30 Salle Renoir / Matisse

#### SESSION PARALLÈLE

➤ **ENVIRONNEMENT - RISQUE D'INONDATION ET LA DISPERSION  
ATMOSPHÉRIQUE DES RADIONUCLÉIDES**

**Présidente : Irène KORSAKISSOK**

Chercheuse en physico-chimie de l'atmosphère (PSE-SANTE / SESUC / BMCA)

**Youness EI-OUARTASSY** - Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejet accidentel dans l'atmosphère : méthodologie, propagation des incertitudes et comparaison à des mesures radiologiques dans l'environnement.

**Charlie SIRE** - L'inversion robuste comme outil d'analyse du risque – application aux défaillances d'ouvrages (naturels et artificiels) dans les analyses probabilistes d'inondation.

**Laurie SAINT CRIQ** - Estimation des événements extrêmes en utilisant de l'information régionale et historique.

## SUJET DE LA THÈSE

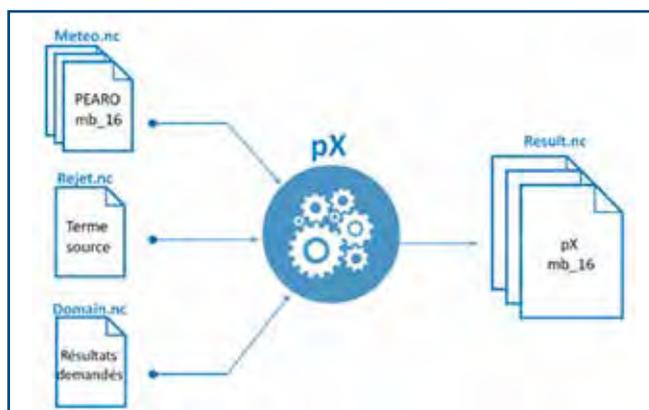
## Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejet accidentel dans l'atmosphère : méthodologie, propagation des incertitudes et comparaison à des mesures radiologiques dans l'environnement

Docteurant :	Youness EI-OUARTASSY
Date du début de la thèse :	09 / 11 / 2020
Laboratoire :	Météo-France / CNRM & IRSN / PSE-SANTE / SESUC / BMCA
Tuteur de thèse (IRSN) :	Irène KORSAKISSOK
Tuteur de thèse (Météo-France) :	Matthieu PLU / Laurent DESCAMPS / Laure RAYNAUD
Directeur de thèse :	Matthieu PLU – Météo-France
Co-directeur :	Irène KORSAKISSOK - IRSN
École doctorale :	Université Toulouse III-Paul Sabatier / Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace.
Financement de thèse :	IRSN / CNRS / Météo-France

Les travaux de thèse présentés portent sur la mise en œuvre d'une approche de modélisation d'ensemble pour simuler la dispersion des polluants en tenant compte des incertitudes inhérentes à la prévision météorologique. L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation des prévisions météorologiques probabilistes à haute résolution spatiale et temporelle et leur couplage avec un modèle de dispersion. Le principe de la prévision d'ensemble est de représenter l'information de façon probabiliste, chaque simulation (ou « membre ») de l'ensemble correspondant à une évolution de la situation ayant une certaine probabilité de se produire.

Une chaîne de modélisation d'ensemble de la dispersion atmosphérique a été mise en place (Figure 1), couplant l'ensemble météorologique à fine échelle de Météo France (PEARO) avec le modèle de dispersion atmosphérique pX de l'IRSN. La chaîne de calcul a été validée sur le Nord-Cotentin, en utilisant les données d'observations de concentration de Krypton 85 mises à disposition par l'IRSN / LRC dans le cadre d'une campagne de mesures (projet DISKRYNOC). L'usine ORANO La Hague effectue régulièrement des rejets du  $^{85}\text{Kr}$  lors du procédé de retraitement du combustible usé, et le terme source (débit de rejet de  $^{85}\text{Kr}$  au cours du temps) a été fourni par ORANO.

Ces données ont été utilisées dans un premier temps pour étudier la sensibilité du modèle pX à différents diagnostics de stabilité atmosphérique utilisés pour modéliser la turbulence dans la couche limite atmosphérique. Ensuite, des scores et indicateurs statistiques probabilistes ont été développés pour évaluer les ensembles de dispersion atmosphérique ainsi construits, par comparaison aux mesures de  $^{85}\text{Kr}$ .



Les résultats montrent l'apport des prévisions d'ensemble par comparaison à une seule prévision déterministe, et leur intérêt potentiel pour la prise de décision. Plusieurs aspects seront par la suite étudiés afin d'améliorer et optimiser le système : comment combiner correctement différentes prévisions d'ensemble faites à partir de différentes initialisations (continuité temporelle des membres) ? Comment générer des scénarios représentatifs pour synthétiser l'information ?

Figure 1 : Illustration de la chaîne de modélisation d'ensemble de la dispersion atmosphérique PEARO-pX

## SUJET DE LA THÈSE

**L'inversion robuste comme outil d'analyse du risque – application aux défaillances d'ouvrages (naturels et artificiels) dans les analyses probabilistes d'inondation**

Doctorant :	Charlie SIRE
Date du début de la thèse :	21 / 09 / 2020
Laboratoire d'accueil :	CNRS / LIMOS & PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Tuteurs de thèse :	RICHEL YANN / PHEULPIN Lucie / ROHMER Jérémy
Directeur de thèse :	LE RICHEL Rodolphe (CNRS LIMOS)
Co-directeur :	RULLIERE DIDIER (CNRS LIMOS)
École doctorale :	École des Mines de Saint-Etienne / ED Sciences Ingénierie Santé
Financement de thèse :	IRSN / BRGM

Les exploitants nucléaires doivent suivre les préconisations du guide de l'Autorité de Sûreté Nucléaire n°13 dans le cadre de la démonstration de sûreté des installations nucléaires de base face au risque d'inondation d'origine externe, accru par la rupture d'ouvrages de protection. Le niveau d'eau de référence, qui est le niveau maximal sur l'emprise d'un site, est ainsi classiquement déterminé à l'aide de modèles numériques complexes et exigeants d'un point de vue computationnel, qui prennent en compte différents types de variables :

- Les variables contrôlées, liées à la géométrie et la localisation des digues de protections.
- Les variables non contrôlées, associées aux phénomènes naturels aléatoires, comme les paramètres de l'hydrogramme en contexte fluvial et les conditions au large (caractéristiques des vagues, marées) en contexte maritime. Les lois probabilistes de ces variables sont généralement connues.
- Les variables profondément incertaines, qui ne sont pas contrôlées mais dont les expressions probabilistes ne sont pas bien caractérisées. Elles sont liées aux paramètres des brèches (dimension, durée du processus).

La thèse s'articule autour de 2 objectifs complémentaires :

- Réaliser une inversion systématique et exhaustive de l'ensemble des combinaisons de variables contrôlées (ensemble d'excursion) qui mène à une inondation avec une probabilité supérieure à un seuil de sûreté  $\alpha$ .
- Proposer une méthode de visualisation de cartes d'inondations informative quant à la loi de probabilité associée.

Le second objectif a été particulièrement étudié, en développant une procédure d'affichage de quelques cartes prototypes représentant au mieux la loi de probabilité de l'événement inondation. C'est un problème de quantification typique, mis en place dans le contexte spécifique de la thèse :

- Tout d'abord, les simulateurs coûteux compliquent le calcul des cartes d'inondations, et un métamodèle doit donc être mis en place.
- Ensuite, l'inondation étant un événement rare, les méthodes de Monte Carlo classiques ne sont pas adaptées pour générer des cartes d'inondation de très grande période de retour (typiquement 10 000 ans), et un échantillonnage adapté est développé (*Importance Sampling*).
- Enfin, la quantification est réalisée dans un espace de cartes pixelisées 64x64, impliquant des problématiques de stockage et un métamodèle adapté à des sorties spatiales.

Les cartes prototypes vont être associées à une probabilité correspondant au cluster qu'elles induisent. La méthode est évaluée sur un exemple analytique et est ensuite étendue au cas côtier des Boucholeurs sur la côte Atlantique et au cas fluvial de la Loire.

## SUJET DE LA THÈSE

## Estimation des événements extrêmes en utilisant de l'information régionale et historique

Doctorante :	Laurie SAINT CRIQ
Date du début de la thèse :	02 / 01 / 2020
Laboratoire d'accueil :	INRS / ETE (Québec) & PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Tuteur de thèse :	Yasser HAMDI
Directeur de thèse :	Éric GAUME - Université Gustave Eiffel
Co-directeur de thèse :	Taha OUARDA - INRS
École doctorale :	Université Paris Est / SIE
Financement de thèse :	IRSN / INRS

L'estimation des niveaux d'aléas naturels à prendre en compte pour la protection des sites nucléaires constitue un enjeu de sûreté important pour l'IRSN. Depuis plusieurs années, le BEHRIG utilise l'analyse statistique des événements extrêmes en utilisant de l'information régionale et historique en réponse à la faible qualité des séries de données utilisées et à la mauvaise représentativité des horsains dans ces séries. L'information régionale renforce l'ajustement statistique au niveau du corps de la distribution, alors que l'information historique améliore l'estimation des valeurs exceptionnelles au niveau de la queue droite de la distribution<sup>[1]</sup>. L'objectif de la thèse est de développer un modèle d'analyse statistique bayésienne des événements extrêmes en prenant en compte proprement l'information additionnelle (régionale et historique), qui, par rapport aux travaux passés, permettent de mieux : i) prendre en compte la dépendance spatiale des observations régionales pour l'information régionale, ii) calculer la durée effective de l'échantillon total pour l'information historique, iii) garantir l'exhaustivité de l'information historique. Le modèle va être développé sur l'aléa submersion marine. Les résultats devraient être directement applicables à l'expertise de sûreté nucléaire.

Le niveau de mer est la somme de la marée astronomique et de la surcote. La distribution des marées astronomiques est déterministe et peut être précisément prédite. Ainsi, l'estimation des niveaux marins extrêmes est souvent basée sur la calibration d'une distribution statistique pour les surcotes extrêmes. Les observations historiques correspondent à des niveaux de mer très élevés. Les surcotes de pleine mer associées peuvent être estimées mais leur exhaustivité, qui est un critère essentiel pour une inférence statistique non biaisée, ne peut pas être garantie. En effet, les surcotes de pleine mer extrêmes peuvent facilement passer inaperçues si elles coïncident avec une marée haute faible ou modérée et n'engendrent pas de niveaux marins extrêmes. Pour faire face à cette problématique d'exhaustivité, dans le cadre de cette thèse, on a proposé une méthode permettant de combiner, dans une seule inférence bayésienne, des séries de surcotes de pleine mer mesurées pour la période récente et des niveaux marins extrêmes pour la période historique. La méthode a été testée à travers des simulations de Monte Carlo à plusieurs sites Européens. Les résultats ont montré que cette méthode est non biaisée et plus fiable que les méthodes proposées jusqu'à présent pour l'intégration de l'information historique dans l'analyse des surcotes extrêmes.

[1] Y. Hamdi, C.-M. Duluc, L. Bardet, V. Rebour : *Development of a target-site-based regional frequency model using historical information*, 2018.

➤ Mardi 29 mars

15h30 - 16h30 Salle Riviera

#### SESSION PARALLÈLE

➤ SANTÉ - TOXICITÉ DES RAYONNEMENTS IONISANTS

**Président : Yann GUEGUEN**

Chercheur en radiotoxicologie et pathologies rénales (PSE-SANTE / SESANE / LRSI)

**Goran RIAZI** - Effet de différentes doses de rayonnements ionisants sur la pathologie anévrismale aortique chez la souris.

**Marie FREREJACQUES** - Étude *Adverse Outcome Pathway* (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide à l'aide d'un modèle organoïde rénal.

**Géraldine LANDON** - Étude de l'efficacité *in vitro* et *in vivo* de formes galéniques de molécules de la famille des biphosphonates pour le traitement de la contamination interne par le strontium et le cobalt.

## SUJET DE LA THÈSE

## Effet de différentes doses de rayonnements ionisants sur la pathologie anévrismale aortique chez la souris

Doctorant :	Goran RIAZI
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Directeur de thèse :	Hafid AIT OUFELLA - Paris Cardiovascular Center
École doctorale :	Bio Paris Sorbonne Cité
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Les anévrismes se caractérisent par une dilatation focale et permanente de la paroi artérielle. Différents types d'anévrismes se distinguent par leurs étiologies diverses et leur localisation. L'anévrisme dégénératif aortique est le plus courant d'entre eux. Chez l'Homme, il est plus courant chez les personnes de sexe masculin et il est favorisé par une accumulation de facteurs de risques tout au long de la vie tels que le tabac, l'alcool, mais aussi l'athérosclérose sévère.

Ce projet a pour objectif d'explorer par une approche *in vivo* et *in vitro* la réponse des doses faibles à modérées / fortes sur différents types d'anévrismes aortiques qui se distinguent par leur microenvironnement cellulaire et moléculaire. D'une part afin d'identifier un potentiel seuil d'apparition d'effet délétère et d'autre part, afin d'identifier la réponse dans le domaine des faibles doses en étudiant les mécanismes qui la médient.

Une première approche chez la souris nous permet de mimer le développement d'anévrisme dégénératif selon deux modèles. Un premier utilisant des souris déficientes en Apolipoprotéine E (ApoE<sup>-/-</sup>) et rendues hypertendues par supplémentation en Angiotensine II ; un second, qui emploie des souris auxquelles une solution d'élastase est déposée localement en péri-aortique après laparotomie. Enfin, l'étude de l'anévrisme aortique syndromique nous est rendu possible par l'utilisation d'un modèle de souris hypomorphes pour le gène FBN1 codant pour la Fibrilline.

Ces trois modèles de souris sont exposés à différentes doses de rayonnements ionisants (50, 500, 1000 et 5000 mGy) à différentes étapes de la pathologie selon un mode d'exposition aiguë externe en corps entier selon deux procédures : avant ou au cours du développement de la pathologie.

Le modèle ApoE<sup>-/-</sup> irradié avant le développement de la pathologie montre une réduction de la dilatation aortique et une diminution dans la survenue d'anévrismes qui pourraient provenir d'une modification de la constitution de la paroi vasculaire avec notamment une modulation des macrophages totaux ainsi qu'une différenciation des cellules musculaires lisses aux plus fortes doses. Sur ce même modèle, les irradiations ayant lieu pendant le développement de la pathologie ne montrent pas de différence comparées aux contrôles. Le modèle syndromique met en évidence une réduction de la mortalité par rupture d'anévrisme chez les souris irradiées à 50 mGy.

Une seconde approche, qui est une approche *in vitro*, permettra quant à elle de mieux comprendre les mécanismes au niveau cellulaire en étudiant l'altération des fonctions des cellules musculaires lisses (principaux acteurs cellulaires dans le développement des anévrismes dégénératifs) exposées à ces différentes doses de rayonnements ionisants.

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude *Adverse Outcome Pathway* (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide  
à l'aide d'un modèle organoïde rénal**

Doctorante :	Marie FREREJACQUES
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LRSI
Tuteur de thèse :	Yann GUEGUEN
Directeurs de thèse :	Yann GUEGUEN – IRSN Thierry HAUET – INSERM
Co-encadrante :	Clara STEICHEN - INSERM
École doctorale :	Université Paris-Saclay / ED569 Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué
Financement de thèse :	IRSN

Le concept *Adverse Outcome Pathway* (AOP) est appliqué en toxicologie pour l'évaluation du risque chimique et environnemental. Sa transposition dans le domaine de la radioprotection permettrait d'améliorer l'évaluation des risques radiotoxicologiques pour la santé humaine. Ce projet s'inscrit ainsi dans les objectifs du groupe thématique de recherche GRT4 « Radiotoxicologie des expositions chroniques ou répétées ». Ce projet repose aussi sur un modèle d'étude *in vitro* 3D: l'organoïde rénal. Cette technologie consiste à générer, à partir de cellules souches humaines pluripotentes induites, des cellules organisées en trois dimensions mimant la structure et la fonctionnalité rénale. Les objectifs de ce projet sont : (1) de caractériser le modèle organoïde et de réaliser son transfert technique à l'IRSN, (2) d'étudier les effets néfastes de l'uranium puis les événements moléculaires, cellulaires et tissulaires afin (3) de les définir et d'établir leurs relations pour construire l'AOP de la toxicité rénale induite par l'uranium. A terme cet outil pourra être utilisé pour d'autres radionucléides ou dans le cadre d'expositions multiples.

En collaboration avec l'équipe INSERM-IRTOMIT spécialisée dans la génération d'organoïdes rénaux, les premières étapes ont été l'acquisition des méthodes spécifiques de culture 3D, la caractérisation phénotypique et fonctionnelle du modèle organoïde en comparaison avec un modèle 2D de référence. Les étapes suivantes ont permis le transfert technique du modèle organoïde à l'IRSN et la mise au point des analyses d'immunohistochimie et mesure d'activités enzymatiques sur l'organoïde. En parallèle, une étude bibliographique des voies moléculaires impliquées dans la réponse cellulaire et tissulaire à l'uranium a été réalisée. La première exposition de l'organoïde rénal à l'uranium a été effectuée pour étudier les effets néfastes de l'uranium en fonction des conditions d'expositions (temps, dose), et réaliser une étude globale par analyse phénotypique (marqueurs de l'apoptose, de la nécrose et évaluation morphologique par coloration HES). En parallèle, une étude par SIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometry*) permettant de localiser l'uranium au niveau cellulaire de l'organoïde a été mise en œuvre en lien avec les études précédemment réalisées au laboratoire. Par la suite, l'étude des événements moléculaires initiateurs et des événements clés moléculaires et cellulaires sera effectuée au regard des connaissances WikiAOP et de la littérature. Enfin l'étude des événements clés tissulaires portera sur l'analyse de la réponse inflammatoire, pro-oxydante, génotoxique, apoptotique et l'identification de lésions tissulaires. L'ensemble des événements clés identifiés et leurs relations permettront de construire le réseau AOP de la néphrotoxicité induite par l'uranium.

## SUJET DE LA THÈSE

Étude de l'efficacité *in vitro* et *in vivo* de formes galéniques de molécules de la famille des biphosphonates pour le traitement de la contamination interne par le strontium et le cobalt

Doctorante :	Géraldine LANDON
Date du début de la thèse :	19 / 05 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LRSI
Tuteur de thèse :	Guillaume PHAN (IRSN) / François FAY (UMR CNRS8612)
Directeur de thèse :	Elias FATTAL- UMR CNRS 8612
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre d'une contamination interne à un radionucléide, la prise en charge du patient est une priorité et implique d'avoir à disposition une thérapie pharmacologique la plus efficace possible. Pour certains radiocontaminants tels que le césium ou l'iode, les traitements en vigueur (le bleu de Prusse et l'iodure de potassium respectivement) existent et ont prouvé leur efficacité. En revanche, concernant le cobalt et le strontium, les thérapeutiques recommandées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (sels calciques de DTPA et gluconate en cas de contamination interne par le cobalt et chlorure d'ammonium et alginate de sodium en cas de contamination interne par le strontium) peuvent être perfectibles. C'est pourquoi, l'objectif de ce projet de thèse est de proposer un traitement plus efficace.

La thèse comporte trois axes majeurs.

Tout d'abord, le premier consiste à identifier une molécule de la famille des bisphosphonates comme agent décorporant potentiel susceptible de former des complexes stables avec le cobalt et le strontium.

Puis, le second axe repose sur l'encapsulation de la molécule d'intérêt au sein de vésicules sphériques appelées liposomes.

Enfin, au cours du dernier axe, le traitement galénique mis au point sera évalué dans des études d'efficacité chez le modèle rongeur.

La première étape a reposé sur des études de complexation métal-ligand par l'intermédiaire de différentes méthodes analytiques (spectrophotométrie UV-VIS, la chromatographie ionique couplée à une détection ICP-MS, la RMN ou encore l'électrophorèse capillaire). Malgré les diverses techniques employées, la caractérisation des complexes n'a pas donné entière satisfaction. Nous avons donc fait le choix de poursuivre avec la molécule BP1 dont nous savons qu'elle forme des complexes stables avec le cobalt (données issues de la littérature scientifique). En collaboration avec l'Institut Galien de l'Université Paris-Saclay, la suite du projet réside dans l'encapsulation de la molécule dans un vecteur médicamenteux sélectif pour cibler plus précisément les organes de rétention des radionucléides. Différents protocoles expérimentaux portant sur la méthode d'encapsulation de la molécule mais également sur l'obtention de liposomes de taille nanométrique sont actuellement à l'étude. Les premiers résultats montrent l'obtention de liposomes de BP1 de taille comprise entre 120 et 150 nm avec un taux d'encapsulation satisfaisant de 40%. La formulation galénique retenue sera ensuite évaluée *in vivo* en comparaison avec les traitements actuellement préconisés.

➤ Mardi 29 mars

15h 30 - 16h 55 Salle Kandinsky

#### SESSION PARALLÈLE

➤ **SÛRETÉ - RISQUE D'EXPLOSION EN SITUATION D'ACCIDENT GRAVE DE RÉACTEUR  
- PHYSIQUE DES AÉROSOLS**

**Président : Ahmed BENTAIB**

Chercheur en accident grave et risque hydrogène (PSN-RES / SAM)

**Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA** - Étude de l'empoisonnement des recombineurs auto-catalytiques passifs.

**Linkai WEI** - Développement d'un nouveau modèle d'explosion de vapeur pour le logiciel MC3D.

**Emmanuel REYES** - Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : modélisation explicite du flux de Stefan et de sa contribution à la diffusiophorèse.

**Modou MBAYE** - Remise en suspension particulaire par impact de jets liquides contaminés sur une surface.

## SUJET DE LA THÈSE

### Étude de l'empoisonnement des recombineurs auto-catalytiques passifs

Doctorante :	Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SAM / BEAM
Tuteur de thèse :	Ludovic MAAS
Directeurs de thèse :	Nabiha CHAUMEIX - CNRS, Ahmed BENTAIB - IRSN, Ernie REINECKE - FZ-Jülich
École doctorale :	Université d'Orléans / Énergie - matériaux - sciences de la terre et de l'univers
Financement de thèse :	IRSN, FZ-Jülich, H2020-AMHYCO

---

The containment of a nuclear reactor is the last barrier preventing the release of radioactive products into the environment in the event of an accident. In case of a core melt accident, hydrogen can reach high concentrations inside the containment and lead to explosions that may threaten its integrity as well as equipment used for severe accident management. In order to mitigate the hydrogen risk, passive autocatalytic recombiners have been installed in many nuclear power plants, notably in France. Recombiners are passive devices that aim to recombine hydrogen through an exothermic catalytic reaction. During normal operation and accidental scenario, these devices are exposed to various volatile compounds, gases and aerosols present in the containment atmosphere. Some of those substances may cause partial or total catalyst deactivation, thus reducing the recombination efficiency.

The objective of this thesis is to investigate the conditions for catalyst deactivation in recombiners by different products, and to improve the models implemented in numerical tools used for safety analysis. For this purpose, experiments have been performed in the REKO platforms at Jülich, Germany.

The experimental campaign performed in REKO-1 focused on carbon monoxide, produced during molten core-concrete interaction and in case of fire. Deactivation by carbon monoxide is observed under oxygen-lean atmosphere. Experiments reveal that deactivation can be predicted by the carbon monoxide fraction, the oxygen fraction and the catalyst temperature. Palladium-based catalysts are less affected than platinum-based ones.

The experimental campaign performed in the REKO-Fire facility focused on the effect of cable fire products on catalysts efficiency under different fire regimes. The results indicate that the presence of carbon monoxide and the deposition of particles due to cable pyrolysis are the main deactivation mechanisms.

The third experimental campaign performed in the REKO-4 facility investigated the impact of oil projections from primary pumps. It has been observed that oil deposition blocks the active sites, but the recombination capacity can be restored after evaporation of the oil if a recombination reaction is initiated by an unpolluted neighboring plate. No chemical adsorption was observed.

The results obtained will be analyzed with the SPARK code, a CFD code developed at IRSN for detailed PARs' modeling, and they will be used as validation data for the improvements of the code.

## SUJET DE LA THÈSE

### Développement d'un nouveau modèle d'explosion de vapeur pour le logiciel MC3D

Doctorant :	Linkai WEI
Date du début de la thèse :	14 / 10 / 2019
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SAM / LEPC
Tuteur de thèse :	Renaud MEIGNEN
Directeur de thèse :	Nicolas RIMBERT – LEMTA ENSEM
École doctorale :	Université de Lorraine / SIMPPÉ ED608
Financement de thèse :	IRSN

L'explosion de vapeur est un phénomène énergétique pouvant survenir au cours d'un accident grave lors de la mise en contact du corium (mélange des matériaux du cœur fondus) et de l'eau de refroidissement. Ce phénomène, analogue à une détonation, est une réaction en chaîne due au transfert de chaleur extrêmement rapide du corium vers le réfrigérant par la fragmentation fine du corium au passage de l'onde de choc.

Le logiciel MC3D, développé par l'IRSN, est reconnu comme référence pour évaluer ce phénomène. Suite aux travaux réalisés durant le projet RSNR-ICE retenu par l'ANR, l'objectif de la thèse est améliorer la modélisation de l'explosion dans MC3D.

Une analyse détaillée du comportement de l'actuel modèle et des calculs de sensibilité ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- les cinétiques de fragmentation de gouttes de corium et de refroidissement de fragments ont un effet déterminant sur la cinétique d'amplification et sur l'intensité de l'explosion. Il existe un *optimum* vis-à-vis de la dimension des fragments générés qu'il est nécessaire de mieux comprendre;
- l'impact de la présence de vapeur dans le réfrigérant est très important pour la phase d'escalade de l'explosion et permettrait d'expliquer la moindre explosivité observée du corium par rapport à d'alumina.

Pour mieux comprendre les processus de transfert thermique et d'ébullition, responsables de la montée en pression, des simulations DNS (Direct numerical simulation) de la fragmentation d'une goutte chaude dans un autre liquide froid ont été réalisées avec le logiciel Basilisk. Néanmoins, dans ces simulations, l'ébullition et la solidification ne peuvent être pris en compte. Elles constituent donc une première étape et montrent que :

- sans fragmentation, la recirculation interne du fluide dans la goutte est importante, ce qui met en question la possibilité de formation d'une croûte solide;
- la fragmentation se déroule sans dispersion importante des fragments, contenus dans une zone de mélange avec le réfrigérant de faible volume;
- les temps caractéristiques de refroidissement et de fragmentation sont différents. La solidification est comparativement plus rapide aux grandes vitesses. Il existerait alors des conditions optimales de vitesse pour le transfert de chaleur et donc l'intensité de l'explosion.

Des comparaisons entre simulations DNS et calculs MC3D en termes de fragmentation et de transfert de chaleur sont en cours. En parallèle, un modèle amélioré pour MC3D est en développement, prenant en compte en particulier la formation d'une « zone de mélange » locale lors de la fragmentation.

## SUJET DE LA THÈSE

### Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : modélisation explicite du flux de Stefan et de sa contribution à la diffusiophorèse

Doctorant :	Emmanuel REYES
Date du début de la thèse :	10 / 12 / 2020
Laboratoire d'accueil :	UMR 6614 - CORIA & PSN-RES / SCA / LPMA
Tuteur de thèse :	Pascal LEMAITRE
Directeur de thèse :	Alain BERLEMONT – CNRS / CORIA
Co-directeur de thèse :	Thibaut MENARD – Université de Rouen
École doctorale :	Normandie Université / PSIME
Financement de thèse :	IRSN / INRS / Région Normandie

---

Question scientifique pour l'IRSN : Améliorer la connaissance de la contamination des écosystèmes pour prévoir l'estimation dosimétrique pour les populations en situation accidentelle.

Lors d'un accident nucléaire, une importante fraction des rejets radioactifs se fait sous la forme d'aérosols. Le lessivage par les gouttes de pluie est un des seuls mécanismes efficaces pour lessiver les aérosols appartenant au mode accumulation de l'aérosol atmosphérique. Ce lessivage est décrit par un paramètre microphysique appelé efficacité de collecte. Ce paramètre décrit la fraction de particules collectées par une goutte lors de sa chute. Le but de ma thèse est d'établir un modèle théorique permettant de déterminer cette efficacité de collecte pour des gouttes de pluie. La méthodologie repose sur des suivis lagrangiens des particules dans des écoulements simulés en DNS. Cependant, un verrou scientifique majeur persiste pour déployer cette approche car pour des nombres de Reynolds supérieurs à 500 les gouttes, à leur vitesse limite de chute oscillent à grande fréquence et se déforment fortement, ce qui rend les équations de Navier-Stokes particulièrement délicates à simuler. Néanmoins, des approches hybrides couplant les méthodes *Level-Set*, *Ghost-Fluid* et *Volume of Fluid* ont été développées à l'université de Rouen et intégrées à un code appelé ARCHER.

Au cours de ma première partie de la thèse, j'ai intégré dans le code ARCHER, un modèle lagrangien de suivi de particules. Puis, je me suis concentré sur la validation des efficacités de collecte déduites de ces suivis lagrangien pour des configurations où il existe soit une solution analytique des équations de Navier-Stokes ( $Re \ll 1$ , solution de Hadamard et Rybczynski), soit des simulations possibles car la goutte reste parfaitement sphérique ( $Re < 400$ , Cherrier et al. 2016). Pour ces premières simulations j'ai considéré dans l'équation de transport des aérosols les forces de traînée, la gravité et le mouvement Brownien. Ces premiers tests ont aussi été l'occasion d'optimiser le maillage, les méthodes d'interpolations, de sorte à avoir des temps de calculs acceptables sans dégrader la qualité des efficacités de collecte calculées. L'idée est de tester l'influence des méthodes d'interpolation qui permettent de connaître les valeurs de vitesse à la position exacte de la particule, dont dans la réalité, ces valeurs sont discrétisées dans un maillage. Également, une étape de validation a été effectuée en utilisant les résultats trouvés dans la littérature.

La deuxième année sera consacrée à l'intégration d'un modèle qui permet de modéliser l'évaporation de la goutte et plus particulièrement le flux de Stefan, pour cela il est envisagé d'implémenter le modèle de Tanguy et al. (2007). Dans cette approche l'interface est considérée à l'équilibre thermodynamique, elle reste donc saturée en vapeur, cette vapeur est ensuite transportée par l'écoulement. Ainsi les effets phorétiques (thermophorèse et diffusiophorèse) pourront être calculés explicitement.

SUJET DE LA THÈSE

Remise en suspension particulaire par impact de jets liquides contaminés sur une surface

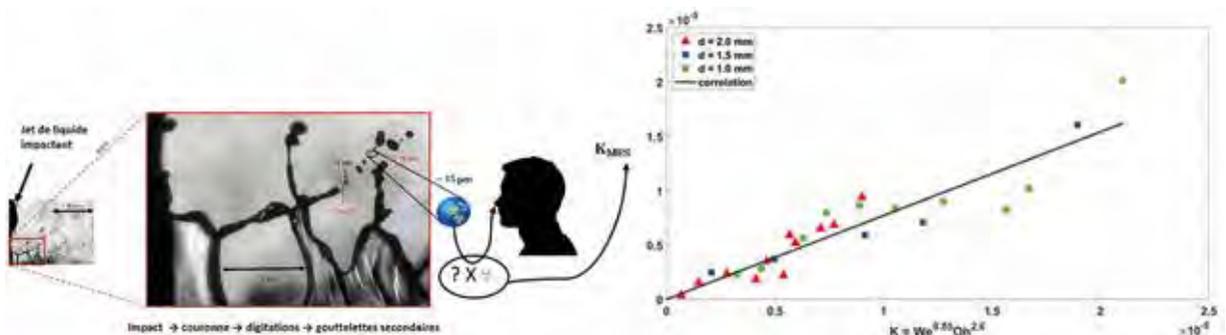
Doctorant :	Modou MBAYE
Date du début de la thèse :	17 / 11 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LPMA
Tuteur de thèse :	Mamadou SOW
Directeur de thèse :	Christophe JOSSERAND - LadhyX
École doctorale :	Institut Polytechnique de Paris / EDIPP
Financement de thèse :	IRSN

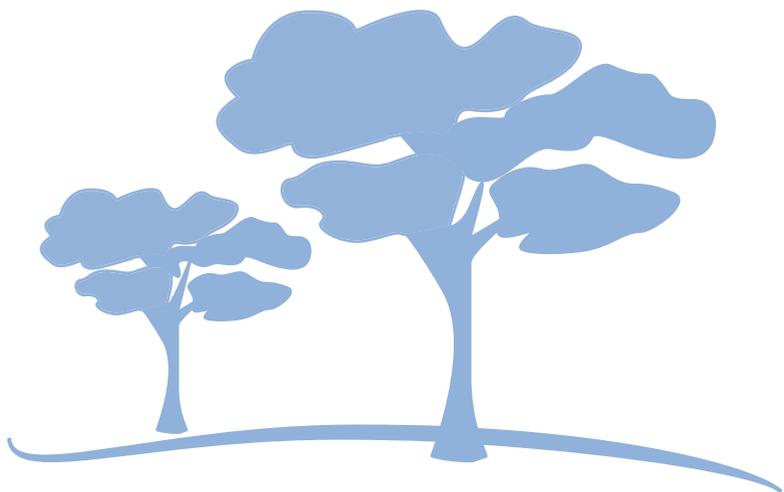
Dans les installations nucléaires de type laboratoires et usines, des scénarios incidentels ou accidentels de chute de liquide contenant des radionucléides peuvent entraîner, *via* des mécanismes de fragmentation de liquide par impact, la formation de gouttelettes engendrant une aérodispersion sous la forme d'aérosols en phase liquide. De ce fait, il est important pour l'IRSN de caractériser la quantité et la distribution granulométrique des aérosols générés afin d'anticiper les éventuels rejets atmosphériques et leurs conséquences sur les opérateurs et le public.

Notre objectif est, d'une part, d'identifier les mécanismes à l'origine de la remise en suspension particulaire liée à l'impact d'une chute de liquide sous la forme d'un jet liquide et, d'autre part, de quantifier les valeurs de coefficients de mise en suspension, exprimant le ratio entre la quantité de contaminant réellement mise en suspension ( $m_{MES}$ ) et celle initialement ( $m_{init}$ ) présente dans le liquide ( $K_{MES} = m_{MES}/m_{init}$ ). Dans cette optique, nous avons développé un dispositif expérimental, nommé « DICAPRIO » (Dispositif de CARactérisation des Particules Remises en suspension par Impact de jets de liquide et d'Observation), qui est une enceinte fermée de volume 0,63 m<sup>3</sup>, instrumentée pour évaluer la quantité d'aérosol mise en suspension ainsi que sa distribution granulométrique.

Nos résultats expérimentaux révèlent que, lorsque le jet liquide est dans le régime de Rayleigh-Plateau (régime laminaire) à une hauteur d'impact supérieure à la hauteur de fragmentation du jet (impact par série de gouttes), l'énergie cinétique de l'impact a une forte influence sur la quantité d'aérosol produite mais ne change pas la forme de leur distribution granulométrique en masse. Celle-ci suit une loi log-normale avec un mode dans la gamme d'aérosol respirable (diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm). Par ailleurs, le ratio massique  $K_{MES}$  est de l'ordre de 10<sup>-5</sup> pour nos expériences et son évolution montre une bonne corrélation avec une combinaison des nombres adimensionnels de Weber (We) et d'Ohnesorge (Oh), dans une gamme : 72 < We < 1200 et 0,0025 < Oh < 0,0062.

Ce travail devra être complété par l'étude de l'influence de la hauteur d'impact et des propriétés physico-chimiques du jet afin de proposer un sous modèle pour la prédiction du  $K_{MES}$  lié à l'impact d'un jet de liquide.





➤ Mardi 29 mars

17h 15-18h 15 Salle Riviera

## SESSION PLÉNIÈRE

### ➤ SÛRETÉ - MODÉLISATION MICROMÉCANIQUE DES MATÉRIAUX

**Présidente: Fabienne RIBEIRO**

Cheffe du Laboratoire de statistique et des méthodes avancées (PSN-RES / SEMIA / LSMA)

**Clément TOSI** - Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l' $UO_2$  irradié.

**Zafilaza Armi MANOROSOA** - Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grain dans l' $UO_2$ .

**Sirine AL DANDACHLI** - Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de la réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales.

## SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l' $UO_2$  irradié**

Doctorant :	Clément TOSI
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Yann MONERIE - LMGC
École doctorale :	Université de Montpellier / I2S
Financement de thèse :	IRSN / EDF

L'objectif de ce travail de thèse est d'améliorer les prédictions du code SCANAIR développé à l'IRSN et destiné à la simulation numérique des crayons de combustible nucléaire en situation d'accident d'insertion de réactivité (RIA).

Ce travail a pour but de simuler le gonflement, la fissuration et la fragmentation de l' $UO_2$  lors d'un RIA. Une des questions principales est la temporalité d'une éventuelle fissuration. Deux hypothèses peuvent être formulées : fissuration lors de la phase de montée en température, auquel cas, l'effet des gaz de fission sur le chargement de la gaine est important, ou fissuration ultérieure lors du retour à froid. Les améliorations visées concernent le comportement thermomécanique du dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ) sous chargements complexes (dynamique, gradients, sur-fragmentation) et la manière dont il est judicieux de le relier à une modélisation (1,5D).

Une étude bibliographique a permis de recenser les données du comportement viscoplastique et de la rupture du combustible  $UO_2$  sur une plage de températures (20-2000°C). Un des objectifs est d'établir un nouveau modèle d'endommagement surfacique viscoplastique pour modéliser la fragmentation du combustible. Le modèle de comportement volumique poro-viscoplastique de [Salvo 2014] a été retenu pour sa pertinence sur de larges plages de températures, vitesse de déformation et de contraintes. Ce modèle a été projeté en un modèle surfacique cohésif en suivant l'approche micromécanique à cinématique réduite de [Nkoumbou Kaptchouang 2019]. L'efficacité numérique du modèle a été analysée sur une formulation point implémentée sous Python.

Ce modèle sera enrichi par un critère de coalescence et implémenté dans XPER. Les différents paramètres matériaux nécessaires pour le combustible  $UO_2$  seront identifiés sur la base de résultats expérimentaux de la littérature. Enfin, durant la dernière année, une campagne de calcul XPER sera menée (simulation du gonflement-fissuration d'un fragment de pastille de combustible en RIA) et les résultats obtenus seront comparés avec des résultats expérimentaux du programme CABRI-REP-Na.

[Salvo 2014] M. Salvo. Étude expérimentale et modélisation du comportement mécanique du combustible  $UO_2$  en compression à haute température et forte vitesse de sollicitation. Phd thesis, Université d'Aix Marseille, 2014.

[Nkoumbou Kaptchouang 2019] N.B. Nkoumbou Kaptchouang. Modélisation micromécanique de l'endommagement ductile par une approche cohésive - volumique : application à l' $UO_2$  irradié. Phd thesis, Université de Montpellier, 2019.

## SUJET DE LA THÈSE

Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grain dans l' $UO_2$ 

Doctorant :	Zafilaza Armi MANOROSOA
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEMIA / LSMA & LMGC Montpellier
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES et Andreï JELEA - IRSN
Directeur de thèse :	Yann MONERIE et André CHRYSOCHOOS – Université de Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier / I2S
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Le relâchement des gaz de fission joue un rôle prépondérant dans le chargement mécanique de la gaine lors d'un accident de réactivité. La rupture des joints de grains est un mécanisme majeur dans le relâchement des gaz. Afin de modéliser ce mécanisme, il est nécessaire de connaître précisément le seuil de rupture des joints de grains. Les valeurs seuil utilisées actuellement dans les logiciels de modélisation thermomécanique du combustible tels que SCANAIR sont encore définies de façon empirique.

Cette thèse, portant sur l'étude du dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ) des réacteurs nucléaires à eau pressurisée, a pour objectif l'évaluation des paramètres de rupture des joints de grains avec une approche multi-échelle. À l'échelle atomique, des calculs de dynamique moléculaire avec un potentiel semi-empirique à charges variables (SMTB-Q) ont été réalisés. Ces calculs de simulation d'essais de traction uniaxiale ont permis d'obtenir les contraintes à rupture locales et les énergies de séparation des systèmes contenant des joints de grains. Plusieurs désorientations des structures cristallines en vis-à-vis ont été étudiées (Figure 1b). La méthode d'analyse des voisins communs (CNA), permettant la caractérisation des systèmes multiphasiques par une analyse cristallographique, n'a pas mis en évidence la formation de nouvelles phases ou la nucléation de dislocations au niveau des joints de grains, la rupture étant de type fragile. À l'échelle mésoscopique, des calculs mécaniques de rupture à l'aide de Modèles de Zones Cohésives (CZM) sont en cours. Le modèle repose sur une approche cohésive-Volumique dans un formalisme multicorps basé sur l'approche Non Smooth Contact Dynamics (NSCD). Afin de raccorder les deux échelles, des prises de moyennes cinématiques, sthéniques et énergétiques sont mises en œuvre. La complémentarité calculs atomistiques-calculs mécaniques (Figure 1a) permettra d'évaluer des critères de rupture utilisables dans les outils métiers.

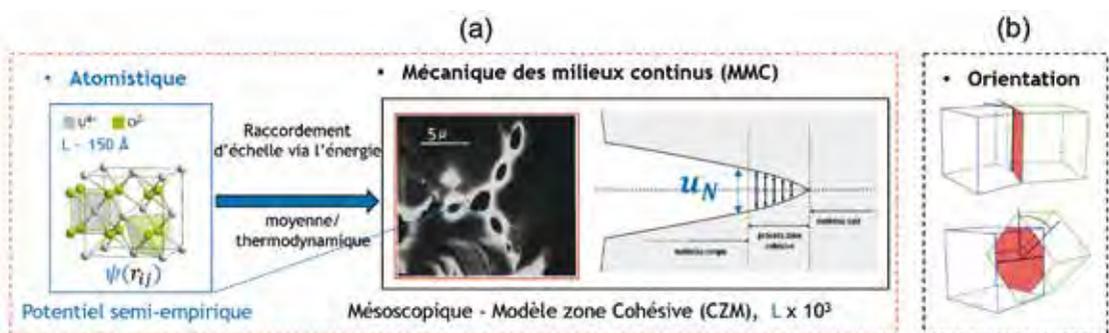


Figure 1 - Illustration de la démarche pour obtenir le critère de rupture des joints de grains (a) et des différentes orientations possibles pour un joint de grains (b).

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de la réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales

Doctorante :	Sirine AL DANDACHLI
Date du début de la thèse :	13 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEMIA / LSMA & LMGC Montpellier
Tuteur de thèse :	Céline PELISSOU
Directeur de thèse :	Moulay Saïd EL YOUSOUFI – LMGC Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier / I2S
Financement de thèse :	IRSN

Le vieillissement des matériaux cimentaires des centrales nucléaires est l'un des axes de recherche de l'IRSN au travers du consortium scientifique CONCRETE et du projet ODOBA. Les sollicitations thermo-hydro-chimio-mécaniques que subissent les centrales nucléaires tout au long de leur durée de vie provoquent leur dégradation, en diminuant leur temps d'exploitation et leur durabilité (tenue mécanique, étanchéité). L'une des pathologies de vieillissement est la Réaction Sulfatique Interne (RSI), qui fait l'objet de ces travaux de thèse.

Cette thèse, réalisée dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN / CNRS / Univ. Montpellier) vise à améliorer la compréhension et la modélisation multi-échelle des mécanismes engendrés par la RSI, en partant de l'échelle de l'interface pâte de ciment / granulat (échelle locale) et en remontant à l'échelle de l'éprouvette (échelle mésoscopique : microstructure du béton composée d'une collection de granulats noyés dans une matrice cimentaire).

À l'échelle locale, des essais expérimentaux de traction, cisaillement et flexion trois points ont été réalisés sur matériaux sains et atteints de RSI afin de caractériser le comportement mécanique d'une pâte de ciment et de l'interface pâte de ciment / granulat. À l'échelle supérieure, les gonflements induits par la RSI sont mesurés par un microscope numérique.

En complément, des investigations numériques et expérimentales sont conduites pour évaluer la propagation de fissures en mode mixte à l'échelle locale du béton. Une méthodologie originale basée sur des éprouvettes composites ciment / granulat en flexion centrée-excentrée est mise en œuvre. Elle permet l'identification des paramètres d'un modèle interfacial à l'échelle locale qui permet, sur la base de constations expérimentales, une modélisation de la fissuration en utilisant des éléments cohésifs-volumiques.

Dans la suite, on s'intéressera à l'étude de la propagation des fissures dans le béton sain et atteint de RSI à l'échelle mésoscopique. Cette étude sera réalisée expérimentalement à partir d'essais de flexion 3 points sur des poutrelles pré-entailées de dimensions 8 x 8 x 32 cm<sup>3</sup>. Les simulations numériques associées seront réalisées en cohérence avec la microstructure réelle basée sur des scans par tomographie à rayons X de haute résolution.

Enfin, une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques de propagation de la fissure dans le béton sera effectuée pour vérifier l'aptitude du modèle proposé à restituer un comportement réaliste de la pathologie RSI.

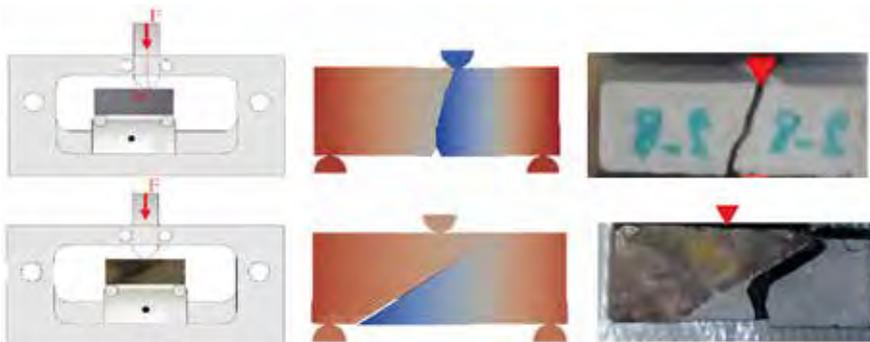


Figure 1.  
Résultats expérimentaux (profils de rupture) et numériques (profils de rupture et champs de déplacement) des éprouvettes à l'échelle locale.

## ➤ Mercredi 30 mars

08 h 30 - 09 h 30 Salle Riviera

### SESSION PLÉNIÈRE

#### ➤ SÛRETÉ - COMPRÉHENSION ET MODÉLISATION DE L'INCENDIE

**Président : Hugues PRÉTREL**

Chercheur en sciences pour l'incendie (PSN-RES / SA21 / LEF)

**Emeline GEORGES** - Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé.

**Safir HADDAD** - Étude de la propagation et du contrôle des fumées d'incendie en galeries souterraines complexes : application à la maîtrise du risque incendie pour des configurations de stockage de déchets radioactifs.

**Laura VASTIER** - Étude de la propagation de flamme dans une atmosphère gazeuse représentative de la phase tardive d'un accident grave dans un REP.

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné  
et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur  
dans un compartiment mécaniquement ventilé**

Doctorante :	Emeline GEORGES
Date du début de la thèse :	19 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SA2I / LEF
Tuteur de thèse :	Hugues PRETREL
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN – IUSTI
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN / EDF

L'une des missions de l'IRSN est d'évaluer le risque incendie dans les installations nucléaires et notamment pour des configurations impliquant des locaux clos et mécaniquement ventilés. Pour certains scénarios, le feu peut se trouver en partie haute du local où les transferts thermiques par rayonnement sont importants et la concentration en oxygène faible. À ce jour, l'influence couplée de ces deux phénomènes sur le processus de combustion et ainsi la puissance du feu est encore assez mal connue. Cette thèse a pour objectif d'étudier les effets de la sous-oxygénation et de l'augmentation des flux thermiques rayonnés sur la combustion d'un feu de nappe situé en hauteur.

De ce sujet émergent deux problématiques. La première est liée à la caractérisation du scénario des foyers en hauteur, et la seconde à la relation entre le taux de pyrolyse (MLR) et le milieu environnant la source incendie.

Cette première année de thèse a été dédiée à la compréhension du scénario des foyers en hauteur à travers trois approches. Tout d'abord une campagne d'essais à échelle réduite a été définie pour étudier l'effet de l'élévation du foyer sur la dynamique d'un incendie. Un exemple d'essai est présenté en Figure 1. Les premiers résultats mettent en évidence les effets antagonistes de l'augmentation des transferts thermiques et de la diminution en oxygène sur le taux de combustion, l'influence de la hauteur de flamme



Figure 1 : Feu de nappe situé à 40 cm de haut.

sur le changement de régime de combustion, ainsi que la modification du processus de remplissage et de la stratification thermique avec la hauteur du foyer. Ce sujet a été également abordé numériquement avec le code CFD CALIF<sup>3</sup>S-Isis afin d'obtenir des informations complémentaires non mesurées lors des expérimentations. Une première validation se basant sur un modèle de turbulence RANS a montré de bons accords sur les ordres de grandeur des températures de gaz. Enfin, une approche analytique a été menée dans le but d'adapter les modèles de remplissage d'un caisson par un foyer au sol au scénario d'un foyer surélevé. Une première version de modèle a été développée et sera ensuite confrontée aux données expérimentales.

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude de la propagation et du contrôle des fumées d'incendie en galeries souterraines complexes : application à la maîtrise du risque incendie pour des configurations de stockage de déchets radioactifs**

Doctorant :	Safir HADDAD
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Samuel VAUX
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN - IUSTI
École doctorale :	Aix-Marseille / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre du projet CIGEO (projet de stockage de déchets radioactifs en couches géologiques profondes), l'étude des feux en milieu souterrain est un des enjeux de sûreté majeurs. En effet, il faut veiller à minimiser le risque d'altérer le confinement des matières radioactives (perte d'intégrité des structures abritant les conteneurs de déchets et dégradation de l'étanchéité de ces conteneurs sous l'effet de l'incendie), et à assurer la sécurité des personnes dans ces installations. Afin d'appréhender au mieux le risque incendie, il est nécessaire de comprendre les différents régimes d'écoulement de la fumée dans le tunnel afin de proposer le type de stratégie de ventilation à mettre en place.

C'est avec cet objectif que les travaux de Romain Hanouzet (thèse IRSN, 2016-2019) ont tout d'abord été réalisés en s'intéressant notamment à la cinétique d'un volume de fumée dans un tunnel incliné, correspondant à la phase instationnaire d'un incendie. Dans la continuité de ses travaux, et dans le cadre de la présente thèse, nous nous concentrons désormais sur la phase stationnaire d'un incendie, et pour laquelle nous considérons donc une injection continue de fumée.

Afin de modéliser théoriquement le comportement aéraulique de la fumée d'incendie, nous l'assimilons à un courant de gravité issu d'une injection d'un fluide léger (mélange air / hélium) se propageant longitudinalement dans l'air environnant. Dans cette configuration, nous avons pu étendre un modèle théorique, basé sur les équations de bilans (masse, quantité de mouvement et énergie) dans un volume élémentaire du courant de gravité, au cadre général non-Boussinesq (écart relatif important entre la masse volumique du courant et celle de l'air ambiant). Ce nouveau modèle nous permet d'estimer les variations des trois quantités d'intérêt (épaisseur, vitesse et masse volumique) du courant. Nous avons également ajouté les contributions de la pente du tunnel et des échanges thermiques entre la paroi et le courant.

Parallèlement à cette approche, nous avons réalisé des simulations numériques aux grandes échelles de référence afin de confronter les résultats donnés par la résolution du modèle théorique et les données numériques. Cette comparaison modèle / simulations sur les quantités d'intérêt est satisfaisante et montre la pertinence de ce modèle dans l'optique d'obtenir des résultats fiables pour un temps de calcul très court. Par la suite, nous planifions une partie expérimentale, sur une maquette de tunnel réduit, afin de mieux comprendre les effets couplés d'une ventilation longitudinale et de la pente pour ce type d'écoulement.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude de la propagation de flamme dans une atmosphère gazeuse représentative de la phase tardive d'un accident grave dans un REP

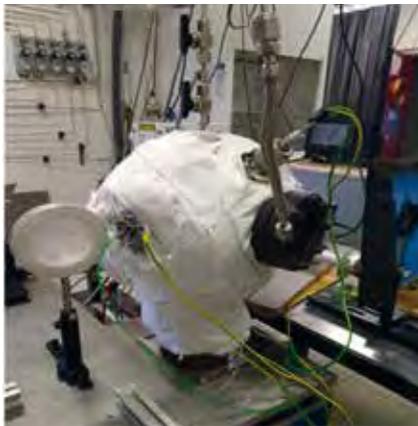
Doctorante :	Laura VASTIER
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2019
Laboratoire :	ICARE – CNRS Orléans, Nagaoka University of Technology (Japon)
Tuteur de thèse :	Ahmed BENTAIB
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX, ICARE – CNRS Orléans / Satoshi Kadowaki, Nagaoka University of Technology (Japon)
École doctorale :	EMSTU Orléans / Nagaoka University of Technology (Japon)
Financement de thèse :	IRSN, Région Centre Val de Loire, H2020 / AMHYCO

L'explosion d'hydrogène constitue une source d'accidents majeurs aussi bien dans les installations industrielles classiques que nucléaires. Dans les installations nucléaires, l'explosion d'hydrogène peut entraîner la perte de confinement des matières radioactives et, par conséquent, des rejets importants dans l'environnement.

Cette thèse a pour vocation de compléter la connaissance concernant la propagation de flamme, générée par la combustion de  $H_2$  et  $CO$ , dans des conditions représentatives de la phase tardive d'un accident grave. En effet, la revue des données existantes, effectuée dans le cadre du projet SAMHYCO-NET, fait apparaître un manque de connaissances dans :

- La détermination des limites d'inflammabilité du mélange composé  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ , et  $CO_2$  en tenant compte de l'impact de la température et de la pression ainsi que celui de l'oxygène,
- La détermination des vitesses de flammes laminaires et turbulentes dans ces conditions,
- Les critères d'accélération et d'étouffement de flamme dans ces conditions en considérant des mélanges homogènes et stratifiés. À ce propos, les résultats obtenus dans le cadre du programme RSNR MITHYGENE montrent un effet significatif de la température initiale sur l'accélération de flammes.

Pour ce faire, la première année de la thèse était dédiée à l'analyse bibliographique qui a permis la définition de la matrice des essais et la mise en place des protocoles expérimentaux. La deuxième année a été dédiée à la réalisation de campagnes expérimentales pour la détermination des limites,



inférieure et supérieure, d'inflammabilité du mélange  $H_2/CO$  pour différentes conditions initiales. Ainsi, l'impact de la pression, de l'appauvrissement en oxygène, et de l'énergie d'inflammation a été étudié. L'impact de la température, de l'ajout d'un diluant tel que le  $CO_2$  est en cours d'investigation à l'aide de la bombe sphérique 8 litres. Par la suite, nous allons déterminer les vitesses de flamme pour les conditions citées précédemment, ainsi que l'impact de la turbulence à l'aide de bombes sphériques de 56 et 93 litres. L'étude de la propagation de flamme en milieu composé de  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  et  $H_2O$  en tenant compte de l'impact de la température et de la pression initiales sera réalisée en utilisant l'installation ENACCEF-2. A l'issue de ces travaux, la rédaction du mémoire de thèse sera finalisée.

## ➤ Mercredi 30 mars

09 h 50 - 10 h 55 Salle Kandinsky

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SÛRETÉ - THERMOHYDRAULIQUE ET NEUTRONIQUE EN SITUATION ACCIDENTELLE

**Président: Olivier MARCHAND**

Responsable d'axe programme PSN-RES

**Giuseppe SPINA** - Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire.

**Juan Esteban LUNA VALENCIA** - Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical vapeur / gouttes à l'échelle d'un sous-canal.

**Kévin FRÖHLICHER** - Mise au point d'une méthode de réduction de variance pour l'optimisation de calculs de transitoires de puissance en Monte Carlo cinétique.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire

Doctorant :	Giuseppe SPINA
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Tuteur de thèse :	Daniele VIVALDI / Guillaume BRILLANT
Directeur de thèse :	Catherine COLIN - IMFT
École doctorale :	Institut National Polytechnique de Toulouse / MEGEP
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Dans un réacteur à eau pressurisée, le générateur de vapeur (GV) est un composant très important pour la sûreté, car la paroi des tubes du faisceau tubulaire qui véhiculent l'eau du circuit primaire participe à la deuxième barrière de confinement. Au sein du GV, ces tubes sont soumis à des phénomènes vibratoires liés aux écoulements diphasiques de l'eau du circuit secondaire à l'extérieur des tubes, qui peuvent causer la rupture d'un ou plusieurs tubes et qui doivent donc être anticipés. Pour ce faire, ces écoulements diphasiques doivent être mieux caractérisés. Cela concerne, en particulier, les détails du comportement vibratoire du faisceau tubulaire soumis à ces écoulements diphasiques et du lien entre un régime d'écoulement diphasique spécifique et la réponse vibratoire.

Le premier objectif de la thèse consiste à caractériser les écoulements diphasiques au sein d'un faisceau tubulaire transverse.

Le deuxième objectif consiste à déterminer le lien entre la réponse vibratoire des tubes et les caractéristiques de l'écoulement. Pour atteindre ces objectifs, la maquette TREFLE (*Two-phase flow Regimes and Fluid-structure interaction Experimental facility*) a été conçue et est en cours de construction à l'IRSN à Cadarache. Différentes conditions d'écoulements diphasiques eau-air, avec des valeurs de taux de vide très différentes, seront testées. Un système d'injection de l'air dédié à la création d'écoulements à bulles et un système d'injection de l'air dédié à la création d'écoulements avec taux du vide supérieurs à 50% ont été conçus. Les campagnes expérimentales prévues d'ici la fin de la thèse peuvent être séparées en deux phases : une première campagne dédiée à la caractérisation de l'écoulement diphasique à travers le faisceau tubulaire, via différentes techniques de mesure, une deuxième campagne expérimentale dédiée à l'investigation du comportement vibratoire d'un tube vibrant au sein du faisceau. Pour cette deuxième campagne, un dispositif spécifique de tube vibrant a été conçu. En parallèle des travaux expérimentaux, des simulations numériques à l'aide du code NEPTUNE-CFD seront réalisées.

L'objectif de ces simulations est d'investiguer les capacités de l'outil numérique à reproduire les écoulements diphasiques réalisés expérimentalement et à reproduire la réponse vibratoire du tube soumis à ces écoulements. Des premières simulations ont été comparées aux résultats de la campagne expérimentale disponible dans la littérature (G.R Noghrehkar, 1999) : les résultats obtenus avec NEPTUNE-CFD sont pertinents en termes de prédiction de la transition entre le régime à bulle et le régime intermittent.

## Références

G.R Noghrehkar, M. K. (1999). Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions. *International Journal of Multiphase Flow*, 25, 857-874. Récupéré sur [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(98\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00075-5).

## SUJET DE LA THÈSE

Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical  
vapeur / gouttes à l'échelle d'un sous-canal

Doctorant :	Juan Esteban LUNA VALENCIA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LEMC
Tuteur de thèse :	Tony GLANTZ
Directeur de thèse :	Michel GRADECK - Université de Lorraine
École doctorale :	Université de Lorraine / SIMPPE
Financement de thèse :	IRSN

Lors d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), une augmentation de la température du combustible ainsi que la chute de la pression dans le cœur peut survenir et éventuellement conduire à des déformations importantes voire à la rupture des gaines des crayons de combustible. La compréhension de l'ensemble de ces phénomènes constitue un enjeu de sûreté important, c'est pourquoi, l'IRSN développe le logiciel DRACCAR dont l'objectif est de reproduire l'ensemble des phénomènes mécaniques, chimiques et thermo-hydrauliques d'un APRP.

Le but de cette thèse est de consolider la capacité du logiciel DRACCAR à simuler de manière précise les différents mécanismes de transfert de chaleur se produisant au niveau d'un sous-canal d'un assemblage en cas de situation de type APRP. Pour cela, des essais expérimentaux sont réalisés sur la boucle COLIBRI, permettant de reproduire l'écoulement fluide caractéristique d'un APRP dans un sous canal partiellement bouché et les échanges parois / fluides s'y déroulant. Cette installation, développée lors d'une précédente thèse (Peña Carillo, 2018), est associée au logiciel mécaniste NECTAR dédié à la modélisation des phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse, ainsi qu'à la dynamique des gouttes dans la section d'essais de COLIBRI. Ce logiciel permet d'analyser les résultats COLIBRI mais aussi de tester différents modèles physiques avant éventuellement de les intégrer dans DRACCAR.

Afin d'étudier un large spectre de conditions thermo-hydrauliques, il a été nécessaire d'apporter des modifications à la boucle COLIBRI. Ces modifications ont permis d'une part d'augmenter la fraction volumique des gouttes et d'autre part la température de vapeur injectée, jusqu'à  $5.10^{-3}$  et  $500^{\circ}\text{C}$  respectivement, contre  $10^{-4}$  et  $160^{\circ}\text{C}$  initialement. De plus, un by-pass de vapeur a été mis en place pour prendre en compte l'effet de la déviation préférentielle du débit de vapeur vers les sous-canaux moins bouchés. Une campagne d'essais a commencé début 2022. Les résultats préliminaires indiquent que le mécanisme de transfert de chaleur qui contribue le plus au refroidissement est la convection entre la vapeur et la paroi, suivi par le transfert par impacts des gouttes vers la paroi.

Peña Carillo, J. D. (2018). Étude expérimentale du transfert paroi / fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur / gouttes dans une géométrie tubulaire. In Thèse université de lorraine. Université de Lorraine.

## SUJET DE LA THÈSE

## Mise au point d'une méthode de réduction de variance pour l'optimisation de calculs de transitoires de puissance en Monte Carlo cinétique

Doctorant :	Kévin FRÖHLICHER
Date du début de la thèse :	14 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SNC / LN
Tuteur de thèse :	Julien TAFOREAU – Mariya BROVCHENKO
Directeur de thèse :	Eric DUMONTEIL – CEA / IRFU
École doctorale :	Paris-Saclay / PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre de ses activités de recherche, le PSN-RES / SNC / LN s'intéresse au développement de méthodes de modélisation dites « haute-fidélité » pour étudier le comportement neutronique des cœurs de réacteurs. L'utilisation de méthodes stochastiques (Monte Carlo) permet, au prix de ressources de calcul importantes, de répondre aux exigences de précision des calculs dits « haute-fidélité ». Toutefois, leur coût devient prohibitif dans les cas dynamiques où l'aspect temporel est à prendre en considération. Pour répondre à ce problème, l'utilisation de méthodes déterministes, basées sur la résolution numérique d'équations physiques, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, pourrait permettre d'accélérer la convergence des calculs stochastiques dans le cas de transitoires de puissance. Cette thèse vise donc à accélérer des simulations stochastiques de transitoires accidentels à l'aide de méthodes déterministes.

Le principe derrière les modélisations Monte Carlo est de simuler les neutrons collision après collision jusqu'à leur disparition. Dans notre approche, les histoires des neutrons sont simulées sans branchement (un unique neutron en sortie de chaque collision) pour éviter les fluctuations importantes de la population, néfastes pour les coûts de calcul, et classées par ordre d'importance. Les histoires les moins importantes sont ensuite ré-échantillonnées d'après les histoires les plus importantes. Ainsi, les neutrons les plus « utiles » sont favorisés afin d'optimiser le calcul, car les particules « inutiles » ne sont plus simulées. Le caractère innovant réside dans le traitement temporel de l'importance, et du ré-échantillonnage. Dans un premier temps, la méthode a été testée dans un code simplifié afin d'établir une preuve de principe, son intégration dans un code industriel est en cours. In fine, les codes déterministes devront être adaptés pour prendre en compte l'aspect temporel dans le calcul de l'importance, afin d'utiliser une carte d'importance issue de calculs déterministes (rapides) afin d'accélérer la convergence du calcul Monte Carlo (précis) pour des cas plus complexes.

La première difficulté rencontrée concernait le choix de la méthode d'accélération. En se basant sur des comparaisons entre des méthodes existantes pour différents types d'applications, un couplage de plusieurs techniques a été retenu, afin d'exploiter leurs avantages pour pallier des problématiques identifiées. Suite à l'obtention de résultats encourageants obtenus sur une maquette, notre méthode a été intégrée dans le code SERPENT2. Comparé à notre maquette, le code SERPENT2 permet la modélisation de systèmes plus complexes (prise en compte de l'énergie des particules, couplages multiphysiques, puissance de calcul accrue), ce qui augmente la complexité de développement de la méthode. C'est pourquoi il est encore nécessaire de parfaire l'implémentation, et de caractériser le fonctionnement de ce nouvel algorithme.

## ➤ Mercredi 30 mars

09 h 50 - 10 h 55 Salle Riviera

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SANTÉ - THÉRAPIE CELLULAIRE POUR TRAITER LES LÉSIONS RADIO-INDUITES

**Président : Alain CHAPEL**

Chercheur en radiobiologie et thérapie cellulaire (PSE-SANTE / SERAMED / LRMed)

**Martin JESTIN** - Modifications du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser la transplantation de cellules souches coliques.

**Mallia GEIGER** - Effet d'une transplantation du microbiote fécal sur les atteintes épithéliales radio-induites du côlon de rat : Potentialisation de l'efficacité thérapeutique induite par les cellules stromales mésenchymateuses.

**Lydia BENSEMMANE** - Impact de la fraction stromale-vasculaire du tissu adipeux pour la régénération de la muqueuse intestinale dans le syndrome gastro-intestinal radio-induit.

## SUJET DE LA THÈSE

Modification du microenvironnement après irradiation localisée du colon :  
identification de voies moléculaires pour optimiser le processus de régénération épithélial

Doctorante :	Martin JESTIN
Date du début de la thèse :	30 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Noëlle MATHIEU
Directeur de thèse :	Fabien MILLIAT - IRSN
École doctorale :	Sorbonne Université / Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique
Financement de thèse :	IRSN

Aujourd'hui, les cancers pelviens ont une prévalence élevée et sont principalement traités par radiothérapie. Bien qu'elle permette un contrôle tumoral, cette thérapie peut également endommager les tissus sains environnants, tel que le colon, et conduire à long terme à des complications invalidantes. La diversité et la complexité de ces séquelles ont amené à la définition de la *Pelvic Radiation Disease* (PRD). Le développement de thérapies innovantes pour améliorer la prise en charge des patients touchés par cette pathologie fait partie intégrante de la stratégie scientifique de l'IRSN. Les projets de recherche du laboratoire ont d'ailleurs mis en évidence l'intérêt d'utiliser les Cellules Stromales Mésoenchymateuses pour traiter ces lésions radio-induites. Au niveau du colon, ces cellules diminuent l'inflammation et stimulent la prolifération des cellules souches coliques (CSC) permettant une réduction de la taille de l'ulcère. Cependant, cet effet thérapeutique reste partiel dû à une déplétion des CSCs et au microenvironnement ( $\mu$ E) inflammatoire post-irradiation.

Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité de ces recherches et utilise un modèle murin de PRD obtenu après irradiation colorectale unique de 26Gy. Des analyses histologiques de la lésion ont permis de déterminer deux temps d'étude du  $\mu$ E colique post-irradiation : le temps J14 pour étudier le processus régénératif précoce et le temps S12 pour observer le processus fibrotique tardif.

La première partie de cette thèse consiste en l'étude du remodelage du  $\mu$ E colique au niveau moléculaire et cellulaire. Les premières études transcriptomiques sur cellule unique réalisées au temps S12 post-irradiation montrent l'apparition de sous-populations cellulaires, exprimant des gènes impliqués dans l'inflammation et la fibrose. Des analyses par cytométrie sont en cours pour confirmer ces résultats.

La seconde partie s'intéresse à l'impact du  $\mu$ E colique irradié sur le processus de régénération épithéliale. Pour cela, le développement d'organoïdes coliques cultivés en 3D est étudié en présence de cellules du  $\mu$ E, irradiées ou non. Les premiers résultats montrent une croissance plus importante des organoïdes en coculture avec les cellules du  $\mu$ E, comparativement à une culture simple. Cet effet est d'autant plus important en coculture avec des cellules irradiées issues du temps S12.

La dernière partie aura pour but de tester l'efficacité de différentes molécules pharmaceutiques ayant une action sur des cibles pertinentes identifiées par études transcriptomiques sur cellule unique. Après des essais *in vitro* sur les cocultures d'organoïdes, la molécule d'intérêt sera expérimentée *in vivo*. L'effet thérapeutique sur la lésion sera étudié au niveau histologique, cellulaire et moléculaire.

## SUJET DE LA THÈSE

**Effet d'une transplantation du microbiote fécal sur les atteintes épithéliales radio-induites du côlon de rat : Potentialisation de l'efficacité thérapeutique induite par les cellules stromales mésenchymateuses**

Doctorante :	Mallia GEIGER
Date du début de la thèse :	04 / 11 / 2019
Laboratoire d'accueil :	PSE SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Alexandra SEMONT
Directeur de thèse :	Fabien MILLIAT / IRSN
École doctorale :	ED394 Sorbonne Université
Financement de thèse :	IRSN

La stratégie thérapeutique dans les cancers de la zone pelvienne inclue dans 60% des cas la radiothérapie. L'irradiation des tissus situés autour de la tumeur a des conséquences pouvant survenir plusieurs années après la dernière séance de radiothérapie. Les symptômes ont donné lieu en 2010 à la définition d'une nouvelle pathologie, la "*Pelvic Radiation Disease*" (PRD). La complexité physiopathologique de la PRD limite l'efficacité des thérapies disponibles. Notre travail mené au sein de l'IRSN s'inscrit dans le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques afin de réduire la toxicité de l'irradiation. Dans ce contexte, nous avons démontré au laboratoire, un effet thérapeutique des cellules stromales mésenchymateuses (CSM). Bien qu'efficace cet effet reste partiel. La protection du tissu de l'irradiation pourrait optimiser l'efficacité des CSM en modulant la réponse inflammatoire. Le microbiote a une influence sur l'immunité. De plus, sa diversité est affectée par l'irradiation. En rétablissant une orthobiose par transplantation fécale (TMF) nous pourrions modifier le type de réponse inflammatoire. Nous nous attendons, en potentialisant l'effet des CSM, à diminuer la gravité des lésions radio-induites du côlon. Cette étude s'articule autour de plusieurs questions : La TMF est-elle efficace sur les atteintes radio-induites tardives de la barrière colique et permet-elle de potentialiser l'efficacité thérapeutique des CSM ? et quels mécanismes sont impliqués dans l'efficacité des traitements ?

Ce travail a nécessité l'établissement d'un protocole d'irradiation colorectale à doses fractionnées (proche de ceux utilisés en clinique) permettant d'obtenir deux types de lésions (modérées / sévères). Les protocoles d'irradiation de doses fractionnées 3x10Gy (lésions modérées) et 3x14Gy (lésions sévères) appliqués tous les deux jours ont été sélectionnés. Ces deux protocoles ont ensuite été utilisés pour effectuer une caractérisation, au cours du temps, de la réponse inflammatoire et épithéliale de l'hôte. En parallèle et en collaboration avec MétaGénoPolis et Cribiom, des études de dynamique temporelle du microbiote et du métabolome après irradiation ont été réalisés. Des protocoles de TMF ont ensuite été testés. Après analyse, il semblerait que l'irradiation, dans les deux protocoles, stimulerait la réponse immunitaire de l'hôte dans une dynamique dose dépendante et provoquerait une diminution de la diversité du microbiote intestinale (mesurer par l'indice de Shannon). En ce qui concerne le traitement, il semblerait que la TMF diminue la toxicité radio-induite sur le côlon dans le protocole d'irradiation modéré.

Cette étude s'inscrit dans le contexte clinique d'une pathologie pour laquelle aucun traitement autre que symptomatique n'est disponible.

## SUJET DE LA THÈSE

## Impact de la fraction stromale-vasculaire du tissu adipeux pour la régénération de la muqueuse intestinale dans le syndrome gastro-intestinal radio-induit

Doctorante :	Lydia BENSEMMANE
Date du début de la thèse :	04 / 11 / 2019
Laboratoire :	PSE-santé / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Christine LINARD
Directeurs de thèse :	Christine LINARD et Xavier TRETON – IRSN / Hôpital de Beaujon
École doctorale :	Sorbonne université / Physiologie, Physiopathologie, thérapeutique
Financement de thèse :	IRSN

L'exposition aux rayonnements ionisants suite à un accident d'irradiation ou un acte de malveillance peut engendrer des conséquences graves sur la santé des personnes impactées. Le syndrome gastro-intestinal (SGI) survient pour des doses supérieures à 6 Gy et se caractérise par l'apparition de nausées, vomissements, diarrhées et de douleurs abdominales. Le SGI est associé à une rupture de la barrière intestinale suite à un dommage sévère des cellules la constituant favorisant ainsi la pénétration au sein du tissu d'agents pathogènes. Les patients souffrent d'une perte de fluides et d'électrolytes massives et développent une septicémie sévère engageant rapidement le pronostic vital en 1 à 2 semaines. L'utilisation de la thérapie cellulaire a montré un intérêt thérapeutique applicable au SGI. En effet le champ d'action des cellules souches mésenchymateuses permet la régénération épithéliale et l'immuno-modulation. Cependant, le temps de culture nécessaire à l'amplification d'un nombre suffisant de cellules souches (21 jours) reste un obstacle à leur utilisation en cas d'accident d'irradiation.

Ainsi, ce projet s'est intéressé à évaluer l'efficacité thérapeutique de la *stromale vascular fraction* (SVF), obtenue par digestion enzymatique du tissu adipeux, sur le SGI.

La thèse s'intéresse d'une part à identifier les cellules cibles *In vivo* et *In vitro* sur un modèle d'organoïdes d'intestin du traitement par la SVF et d'autre part à évaluer le rôle des cellules myélo-monocytaires de l'hôte dans son efficacité thérapeutique. Le jour de l'irradiation abdominale (18Gy), les souris reçoivent une injection (i.v.) de SVF ( $2,5 \times 10^6$  cellules). 7 jours post-irradiation, le traitement a limité la perte de poids et la perméabilité intestinale entraînant une augmentation de la survie des souris.

Le modèle d'organoïde a montré que la SVF accélérât la régénération intestinale en stimulant le compartiment cellules souches (*via* les cellules de Paneth et Lgr5+) initiant ainsi une différenciation cellulaire dès 6 jours contre 8 jours sans traitement.

L'analyse phénotypique des monocytes montre une augmentation de la population de monocytes (C11b<sup>+</sup> / Ly6C<sup>+</sup> / Cx3cr1<sup>+</sup>) capable de se différencier en macrophages anti-inflammatoires, associée à une répression des cytokines inflammatoires. Ces résultats montrent que l'injection intraveineuse de SVF en induisant une régénération de l'intestin associée à un effet anti-inflammatoire pourrait être une voie thérapeutique prometteuse du traitement en urgence du SGI.

## ➤ Mercredi 30 mars

09 h 50 - 10 h 45 Salle Renoir / Matisse

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ENVIRONNEMENT - PROCESSUS DE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES

**Président : Rodolphe GILBIN**

Chef du Service de recherche sur les transferts et les effets des radionucléides sur les écosystèmes (PSE-ENV / SRTE)

**Tingting GENG** - Identification des sources et des mécanismes de transport responsables de la dissémination des contaminants radioactifs à l'aval des anciens sites miniers à l'aide des isotopes stables de plomb.

**Zeinab MAWASSY** - Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire de radionucléides sous forme particulaire.

**Louise DARRICAU** - Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères : approches minéralogiques et modélisation géochimique.

## SUJET DE LA THÈSE

**Identification des sources et des mécanismes de transport responsables  
de la dissémination des contaminants radioactifs à l'aval des anciens sites miniers  
à l'aide des isotopes stables de plomb**

Doctorante :	Tingting GENG
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Tuteur de thèse :	Olivier Péron / Arnaud Mangeret / Karine David
Directeurs de thèse :	Gilles Montavon – CNRS, Alkiviadis Gourgiotis - IRSN
École doctorale :	Université de Nantes / ED 596 Matière, Molécules et Matériaux
Financement de thèse :	IRSN et Bourse de la région Pays de Loire

Les activités minières peuvent contribuer à renforcer les concentrations en radionucléides naturels de la chaîne de  $^{238}\text{U}$  dans les sols, les sédiments ou les zones humides à l'aval des sites d'exploitation. Cependant, l'altération et l'érosion de la roche mère peuvent conduire également à de fortes teneurs dépassant la valeur moyenne du fond géochimique local et potentiellement comparables à celles en lien avec les activités minières <sup>[1,2]</sup>. Il est alors nécessaire de tracer les sources de contamination et de comprendre le mécanisme de dissémination des éléments radioactifs à proximité des anciennes mines d'U afin d'envisager une gestion efficace<sup>[3]</sup> et une remédiation des sédiments et sols contaminés.

L'objectif de cette thèse est de différencier les sources de contamination en utilisant les isotopes stables du plomb ( $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ), d'étudier le mécanisme de dissémination à l'aide de déséquilibres radioactifs et d'illustrer finalement *via* la relation spatiale l'analogie entre les mesures *in situ* de rayonnement gamma et celles des isotopes stables du Pb.

Le site d'étude considéré est la zone humide à l'aval de l'ancien site minier de Rophin, qui fait partie de la Zone Atelier des Territoires Uranifères (ZATU) et présente une activité élevée en U (~3147 mg / kg vs un fond géochimique local de 34 mg / kg). Les premiers résultats isotopiques du Pb dans une archive sédimentaire mettent en évidence des apports miniers, surtout au niveau d'une couche blanche argileuse. A l'aide des équations de mélange isotopique ainsi que d'une fine caractérisation des pôles de mélange basée sur le  $^{204}\text{Pb}$ , le pourcentage de la contribution minière a été calculée <sup>[4]</sup>. Grâce aux déséquilibres radioactifs de la chaîne de  $^{238}\text{U}$  et plus particulièrement grâce au rapport d'activité ( $^{230}\text{Th} / ^{238}\text{U}$ ), la mobilité de l'U a été mise en évidence. Une hypothèse proposée ici est la migration d'U, depuis les apports miniers (phases particulaires) vers les sols, sous forme dissoute<sup>[5]</sup>. Afin de vérifier cette hypothèse, les travaux en cours visent à recréer le système phases porteuses de radionucléides - eau porale - sol de Rophin, pour étudier la labilité d'U, Pb et à tracer leurs origines *via* l'isotopie du Pb. En complément, une caractérisation isotopique des phases porteuses sera réalisée afin d'obtenir des informations sur la conservation de la signature isotopique du Pb du minerai lors des processus de transport et de dépôt.

## Références

- [1] Mangeret, A.; Blanchart, P.; Alcalde, G.; Amet, X.; Cazala, C.; Gallerand, M.-O. An Evidence of Chemically and Physically Mediated Migration of  $^{238}\text{U}$  and Its Daughter Isotopes in the Vicinity of a Former Uranium Mine. *Journal of Environmental Radioactivity* 2018, 195, 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.018>.
- [2] Cuvier, A.; Pourcelot, L.; Probst, A.; Prunier, J.; Le Roux, G. Trace Elements and Pb Isotopes in Soils and Sediments Impacted by Uranium Mining. *Science of The Total Environment* 2016, 566–567, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.213>.
- [3] Regenspurg, S.; Margot-Roquier, C.; Harfouche, M.; Froidevaux, P.; Steinmann, P.; Junier, P.; Bernier-Latmani, R. Speciation of Naturally-Accumulated Uranium in an Organic-Rich Soil of an Alpine Region (Switzerland). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2010, 74 (7), 2082–2098. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.01.007>.
- [4] Gourgiotis, A.; Mangeret, A.; Manhès, G.; Blanchart, P.; Stetten, L.; Morin, G.; Le Pape, P.; Lefebvre, P.; Le Coz, M.; Cazala, C. New Insights into Pb Isotope Fingerprinting of U-Mine Material Dissemination in the Environment: Pb Isotopes as a Memory Dissemination Tracer. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54 (2), 797–806. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04828>.
- [5] Martin, A.; Hassan-Loni, Y.; Fichtner, A.; Péron, O.; David, K.; Chardon, P.; Larrue, S.; Gourgiotis, A.; Sachs, S.; Arnold, T.; Grambow, B.; Stumpf, T.; Montavon, G. An Integrated Approach Combining Soil Profile, Records and Tree Ring Analysis to Identify the Origin of Environmental Contamination in a Former Uranium Mine (Rophin, France). *Science of The Total Environment* 2020, 747, 141295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141295>.

## SUJET DE LA THÈSE

Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire  
de radionucléides sous forme particulaire

Doctorante :	Zeinab MAWASSY
Date du début de la thèse :	16 / 11 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV\SRTE\LR2T
Tuteur de thèse :	Pascale HENNER
Directeur de thèse :	Jérôme ROSE - CEREGE
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN

After an atmospheric release, particles can serve as carriers for radionuclides. Contrary to gaseous or dissolved radionuclides source term, these species have not been assessed specifically regarding their transfer to plants, thus questioning the performance of existing tools for risk assessment linked to the ingestion pathway of existing or future situations (e.g. ITER). The foliar transfer of particles in plants would depend on particles nature, hydrophilicity and size due to the negatively charged leaf surface and size exclusion limits of the "pores" in biological barriers used for in planta movement. Different plants criteria like stomatal opening, density, hairs, cuticle thickness and stage of growth could modulate the process of incorporation (stomatal or cuticular) and internal translocation. In this PhD, we'll first acquire the experimental data needed to test existing modelling tools against possible transfer on particles to plant. Then we'll try to improve them at a second stage if needed. Non-reactive CeO<sub>2</sub> particle with relevant size range (10 nm-3 µm) will be used as NPs tracer to expose plant conditioned, addressing specifically the targeted pathway and the interface properties.

A first set of experiments were designed to set up exposure parameters and acquire primary data regarding the (nano) particles (CEREGE) and plants (IRSN) side. Particles of different sizes (10, 20-30, 50, 100, 200 nm) have been verified for their crystallinity using XRD. The hydrodynamic diameter, zeta potential and IEP have been tested by DLS for 200 nm and 20-30 nm particles, in favor of optimizing the disaggregation condition by tuning the concentrations of the stock and plant contamination solution (down to 1g / l and 20 mg / l respectively). This testing will run over the other sizes. Radish and lettuce cultures had been launched to collect data on species-specific criteria including leaf area, number, trichomes density, stomatal density and aperture kinetics as a function of day / night conditions, cuticle thickness (using microscopy) and Ce concentration level (ICP-MS). At selected developmental and physiological (stomatal status) stages, leaves will be drop contaminated by particles suspension solution to collect data on the kinetics of particle-foliage interaction through different contamination-rinsing time-lapse, determine Ce detection limit, quantify initial fluxes, and localize the particles within plant tissues (e.g. TEM-EDX). Initial results will classify particles regarding the transfer processes and will highlight the needed for deeper localization and quantification analysis of particles using techniques at CEREGE (XRF, tomography and LA-ICP-MS).

## SUJET DE LA THÈSE

## Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères : approches minéralogiques et modélisation géochimique

Doctorante :	Louise DARRICAU
Date du début de la thèse :	26 / 01 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Tuteur de thèse :	Arnaud MANGERET / Josselin GORNY
Directeur de thèse :	Alexandra COURTIN - GEOPS
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences
Financement de thèse :	IRSN

Les minéralisations uranifères exploitées en France jusqu'en 2001 peuvent être associées à des phases minérales porteuses d'éléments traces (ET) potentiellement toxiques de par leurs formes et / ou leurs teneurs<sup>[1,2]</sup>. Certains ET présents dans les stériles et les résidus peuvent être relativement mobiles et ainsi redistribués dans les divers réservoirs de la zone critique<sup>[3]</sup> comme les sédiments. Dans une perspective de curage de sédiments lacustres contaminés par des apports miniers, l'effet cocktail de la présence d'ET sur la mobilité de l'uranium reste mal connu.

Dans cet objectif, nous étudions les sédiments du Lac de Saint-Clément (Allier, France) impactés par l'ancien site minier uranifère des Bois Noirs Limouzat et l'ancienne mine cupro-stannifère de Charrier<sup>[4]</sup>. Les facteurs d'enrichissement et de géoaccumulation calculés le long d'une carotte de sédiments ont notamment mis en évidence une contamination significative en Cu, Bi et Sn d'origine anthropique, dont les niveaux les plus importants résultent du réaménagement du terril de la mine de Charrier. L'enjeu de notre étude est ainsi d'étudier la spéciation solide de ces ET dans les sédiments réoxydés et d'identifier les processus géochimiques régissant leur mobilité dans ces conditions.

Pour répondre à ces objectifs, des analyses minéralogiques (MEB, EPMA) et des extractions chimiques ont été menées pour étudier les phases porteuses des ET ainsi que des tests de lixiviations pour comprendre leur degré de stabilité. Les premiers résultats montrent que la spéciation de Sn est dominée par la cassitérite, phase minérale très peu soluble<sup>[5]</sup> provenant du terril de Charrier. A ce stade, les données préliminaires sur Bi ne permettent pas d'identifier ses phases minérales porteuses et le test de lixiviation normé TCLP simulant un stockage des sédiments en conditions oxydantes ne met pas en évidence Sn et Bi dans les lixiviats. Les données de spéciation sur Cu ont montré l'existence de sulfures hérités de la mine de Charrier *e.g.* chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et covellite (CuS) ainsi que des formes de Cu adsorbées sur la matière organique. Le test de lixiviation présente moins de 2% du Cu lixiviable des sédiments. Ces premiers résultats suggèrent un risque faible de migration de Sn et Bi et une instabilité potentielle de Cu qui reste à préciser.

Afin de mieux comprendre le comportement géochimique de ces ET, des études complémentaires par spectroscopie XAS sont prévues pour poursuivre l'identification des formes solides (spéciation) du Cu et Bi dans les sédiments et comprendre leur évolution à long terme dans des conditions supergènes, et ainsi comprendre et prévoir leur mobilité potentielle et leur (bio-)disponibilité.

[1] Somot, S. (1997), Thèse Univ. Lorraine; [2] Lottermoser et al. (2005), JGE, 01.001; [3] Abdelouas, A. (2006), GSE, 2.6.335; [4] Mangeret et al. (2020) JER, 222, 106324; [5] Hall et al. (1980), CG, 0009-2541(80)90120-5.

## ➤ Mercredi 30 mars

11 h 15 - 12 h 15 Salle Klee

### SESSION POSTERS

Voir pages 109 à 140 les résumés des thèses des doctorants de première année.

13 h 45 - 14 h 45 Salle Riviera

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SANTÉ - EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS

**Présidente : Christelle ADAM-GUILLERMIN**

Chercheuse en écotoxicologie (PSE-SANTE/SDOS/LMDN)

**Yann THIBAUT** - Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire.

**Kévin LALANNE** - Caractérisation de microfaisceaux d'ions et R&D sur l'installation MIRCOM.

**Ahmad SLEIMAN** - Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode *C.elegans* : rôle de la mitochondrie et des dommages nucléaires.

## SUJET DE LA THÈSE

## Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire

Doctorant :	Yann THIBAUT
Date du début de la thèse :	07 / 09 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SDOS / LDRI
Tuteur de thèse :	Yann PERROT
Directeur de thèse :	Sébastien INCERTI - CNRS / IN2P3, LP2i Bordeaux
École doctorale :	Université de Bordeaux / Sciences Physiques et de l'Ingénieur
Financement de thèse :	IRSN

Cette thèse s'inscrit dans le programme de recherche ROSIRIS dont l'objet est de mieux connaître les mécanismes à l'origine des effets secondaires des radiothérapies dans le but d'améliorer les modèles de risque, en donnant par exemple, une nouvelle définition du RBE. Pour y parvenir, un outil de modélisation prédictif liant les étapes du dépôt d'énergie jusqu'aux effets biologiques tardifs doit être développé. Au cours de deux précédentes thèses liées à l'axe 1 de ROSIRIS portant sur les effets précoces radio-induits, des modèles de noyaux cellulaires ainsi qu'une chaîne de simulation nanodosimétrique ont été développés pour le calcul de la topologie des dommages précoces radio-induits à l'ADN pour un noyau cellulaire. Dans cette thèse on souhaite passer à la caractérisation de cette topologie à l'échelle d'une population cellulaire, à des temps plus tardifs, ce qui permettra d'établir le lien avec l'axe 2 de ROSIRIS, portant sur la compréhension de la dynamique des événements moléculaires impliqués dans la réponse cellulaire. La simulation par méthode Monte-Carlo du comportement de l'ensemble du tapis cellulaire est inenvisageable, donc de nouvelles méthodologies de calculs dosimétriques sont nécessaires pour remplir cet objectif.

Dans un premier temps, un nouveau modèle géométrique de noyau cellulaire, plus réaliste, a été développé afin d'améliorer les résultats issus de la chaîne de simulation nanodosimétrique, basée sur Geant4-DNA. Ce nouveau modèle a permis de mettre en valeur l'importance de la distribution réaliste des différents degrés de compaction de la fibre de chromatine dans les modèles. Dans un second temps, un outil de microdosimétrie a été développé pour permettre la distribution réaliste des dépôts d'énergie à chaque cellule d'une population cellulaire sur une large gamme de qualité de rayonnement. Cet outil a été vérifié grâce à des résultats issus de simulation Monte-Carlo et doit être validé grâce aux expérimentations menées par le laboratoire de l'IRSN LRAcc, sur AMANDE, dans le cadre du projet MODELL. Ce premier maillon, couplé aux résultats nanodosimétriques obtenus à l'échelle d'un noyau permettra la distribution des dommages précoces à l'ADN de chaque cellule de la population cellulaire. Par la suite, plusieurs modèles de réparation cellulaire issus de la littérature ou propres aux expérimentations menées à l'IRSN, seront implémentés pour modéliser des observables comme l'évolution temporelle du nombre de foci ou la sénescence.

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisation de microfaisceaux d'ions et R&amp;D sur l'installation MIRCOM

Doctorant :	Kévin LALANNE
Date du début de la thèse :	06 / 10 / 2019
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SDOS / LMDN
Tuteur de thèse :	François VIANNA-LEGROS
Directeur de thèse :	Didier TONNEAU / CINaM - Luminy
École doctorale :	AMU / Physique et science de la matière
Financement de thèse :	IRSN

L'installation MIRCOM construite fin 2018 accueille une ligne de microfaisceau d'ions pouvant irradier des échantillons biologiques vivants. Les activités de radiobiologie menées sur MIRCOM ont pour objectifs de mieux identifier et prévenir les effets des rayonnements ionisants utilisés dans le domaine médical, notamment en faisant le lien entre les grandeurs physiques macroscopiques et les phénomènes biologiques tissulaires, cellulaires, voire subcellulaires, observés.

Cette thèse pose la problématique suivante :

**Comment faire de MIRCOM, une installation de référence en radiobiologie ?**

Pour répondre à ces questions, cette thèse s'articule en trois axes :

- premièrement, étendre l'éventail des ions disponibles, plus lourds que les protons, et les caractériser. La ligne permettra ainsi de délivrer des faisceaux d'ions hélium, carbone et oxygène.
- deuxièmement, mettre en place un système de détection, en amont du porte-échantillon, basé sur la collecte des électrons secondaires émis lors du passage des ions à travers la fenêtre d'extraction en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  par un Channeltron. Cette émission est optimisée par des dépôts de CsI sur la fenêtre d'extraction.
- troisièmement, modéliser l'intégralité de la ligne avec le code de calcul Monte-Carlo GEANT4, qui permettra de simuler les différentes irradiations effectuées sur MIRCOM et qui deviendra à terme un outil de référence pour les radiobiologistes.

En parallèle, cette thèse est au cœur d'une collaboration avec le CINaM, Centre interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille, avec le développement d'un détecteur de résolution spatiale sub-micrométrique qui permettra de mesurer la géométrie du microfaisceau à l'air.

Durant les deux années, plusieurs résultats ont été obtenus :

- La finalisation de la caractérisation des faisceaux d'ions  $\text{H}^+$  ainsi que l'obtention de résultats préliminaires concernant la caractérisation des faisceaux d'ions  $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{C}^{3+}$  et  $\text{O}^{3+}$ .
- La caractérisation du système de détection avec l'ensemble des ions.
- Les travaux avec le CINaM ont permis de mettre en place un support spécifique permettant d'accueillir le dispositif, d'optimiser les mesures de bruit de fond, de détecter le microfaisceau d'ions  $\text{H}^+$  et de caractériser un modèle de détecteur.

Ces résultats feront l'objet de trois publications, actuellement en cours de rédaction.

## SUJET DE LA THÈSE

Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode *C. elegans* :  
rôle de la mitochondrie et des dommages nucléaires

Doctorant :	Ahmad SLEIMAN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	SANTE / SDOS / LMDN
Tuteur de thèse :	Christelle ADAM GUILLERMIN
Directeur de thèse :	Simon GALAS – CNRS UNIVERSITE DE MONTPELLIER
École doctorale :	Aix Marseille Université / Sciences de la vie et de la santé
Financement de thèse :	IRSN

Un des objectifs de l'IRSN est la compréhension approfondie des effets indésirables induits par les rayonnements ionisants. Quelle que soit leur origine (spatiale, environnementale, médicale, accidentelle), toutes les formes de rayonnements ionisants, des photons (rayons X et  $\gamma$ ) aux particules chargées lourdes (protons ou ions carbone), peuvent induire une neurotoxicité. Malgré l'augmentation de la littérature scientifique et clinique permettant de mieux comprendre comment les rayonnements provoquent des lésions cérébrales, les mécanismes précis de neurotoxicité et de neurodégénérescence suite à une exposition aux rayonnements ionisants restent mal compris d'un point de vue biologique.

Comme l'irradiation ciblée par microfaisceaux permet l'ablation de régions spécifiques dans le système nerveux, nous avons décidé d'étudier, à l'aide du microfaisceau MIRCOM de l'IRSN, les conséquences de l'exposition aux protons chez le nématode *C. elegans* notamment les dommages au niveau de la mitochondrie et du noyau.

Afin d'immobiliser les vers *C. elegans* extrêmement mobiles, nous avons développé un premier prototype des puces microfluidiques en verre pénétrables aux protons 4 MeV, permettant ainsi l'immobilisation indispensable à l'irradiation ciblée dans des conditions vivantes pour *C. elegans*. Dans ces puces, une première chambre est utilisée pour injecter la solution contenant les vers et une deuxième chambre pour injecter un chimoattractant, permettant aux vers adultes de passer par capillarité dans 15 canaux espacés de 2mm. Ces canaux ayant la forme d'entonnoir avec un diamètre final de 40 $\mu$ m, ils permettent le piégeage des nématodes. La récupération des vers se fait en inversant le sens d'écoulement dans la chambre.

Les premières expériences au niveau moléculaire ont consisté à établir une preuve de concept de la neurotoxicité radio-induite, axée sur la microirradiation des neurones des ganglions de la tête de la souche OH144 (marquage fluorescent pan-neuronal) et la validation de la puce microfluidique. Les premières études moléculaires ont révélé une perte du potentiel membranaire mitochondrial témoignée par la dissipation du TMRE. La deuxième année de thèse sera consacrée à la finalisation de la puce microfluidique et à la poursuite de l'étude des dommages moléculaires. Pour cela nous procéderons de la manière suivante :

- l'irradiation des transgènes du stress mitochondrial : sod-1, sod-3, hsp-6;
- la mesure de la respiration mitochondriale par Seahorse XF;
- l'irradiation des nématodes marqués aux marqueurs fluorescents des espèces réactives (MitoSOX™ Red, H<sub>2</sub>DCFDA), du potentiel membranaire (TMRE, JC-1, MitoTracker™ Red) et de l'intégrité membranaire (MitoTracker™ Green);
- l'irradiation des mutants de la fission (drp-1(tm1108)) et fusion (fzo-1(cjn20)) mitochondriales;
- l'irradiation des transgènes de la réponse aux dommages à l'ADN (DDR) : rad-51, cep-1, hus-1 et rpa-1;
- l'étude de la transcription des gènes d'intérêt par la technique de *single Worm*;
- l'étude du comportement moteur et sensoriel.

En fonction des résultats obtenus, les études suivantes seront focalisées sur une maladie neuro-dégénérative (e.g. Parkinson).

## ➤ Mercredi 30 mars

13h 45 - 15h 10 Salle Renoir / Matisse

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ENVIRONNEMENT - STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE DÉCHETS NUCLÉAIRES

**Président: Didier GAY**

Adjoint au directeur de la Stratégie, délégué aux affaires scientifiques

**Charlotte DEWITTE** - Étude multi-physique de l'influence de la précipitation de M-S-H sur le comportement chemo-mécanique de matériaux cimentaires.

**Jad EL ALAM** - Caractérisation des hétérogénéités hydriques et texturales des argiles gonflantes par la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) : application aux essais *in situ* de Modern2020 au Laboratoire de Recherche Souterrain à Tournemire.

**Julie POUYA** - Modélisation chemo-mécanique du comportement des bétons soumis à des réactions sulfatiques externes.

**Yara BARAKAT** - Impact des panaches salin / alcalin sur le gonflement et l'auto-colmatage d'une argile endommagée.

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude multi-physique de l'influence de la précipitation de M-S-H sur le comportement chemo-mécanique de matériaux cimentaires**

Doctorante :	Charlotte DEWITTE
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Mejdi NEJI – IRSN / Alexandra Bertron - LMDC
Directeur de thèse :	Alexandre DAUZERES – IRSN
Co-Directrice :	Laurie Lacarrière – LMDC
École doctorale :	Mécanique, énergétique, génie civil, procédés (MEGeP)
Financement de thèse :	IRSN

L'IRSN est en charge d'évaluer la sûreté de la conception du projet Cigéo, projet de stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs HA-MAVL. L'un des grands enjeux de sûreté de ce dossier concerne les dispositifs de fermeture. A ce stade du projet, ceux-ci seront composés d'un noyau de bentonite, bloqué entre deux massifs d'appui en béton bas-pH. Les études menées ces dernières années par l'IRSN ont mis en avant une interaction physico-chimique forte entre la roche hôte et le béton de ces massifs d'appuis. Un enrichissement en magnésium, provenant de l'argile, a notamment été observé au sein de la matrice cimentaire. Des études ont mis en évidence la formation de brucite et de silicates de magnésium hydratés (M-S-H) dans le matériau cimentaire. Les mêmes phénomènes ont été observés au niveau de barrages et de structures marines au contact d'eaux plus ou moins riches en magnésium. La précipitation des M-S-H se produit lorsque les silicates de calcium hydratés (C-S-H), phase liante d'une matrice cimentaire, se décalcifient. Ces changements physico-chimiques soulèvent des questions quant à leurs impacts potentiels sur le comportement mécanique du matériau.

La thèse propose une étude multi-physique, à l'échelle mésoscopique, de l'altération de matrices à faible teneur en calcium par des eaux contenant du magnésium. Il s'agit de comprendre les mécanismes réactionnels de la formation des M-S-H au sein des matrices cimentaires à faible teneur en calcium, et d'étudier son influence sur les propriétés micro-structurelles et mécaniques.

Deux pâtes cimentaires (pâte modèle à base de silice colloïdale et pâte réelle à base de fumée de silice et de laitier) ont été exposées à des solutions avec des concentrations en Mg différentes (5 et 50 mmol / L). La caractérisation chimique et minéralogique a permis de voir qu'une profonde décalcification a lieu en parallèle d'un fort enrichissement en magnésium de la pâte, correspondant à la formation de M-S-H. Les caractérisations micro-structurelles et mécaniques (par nano-indentation), réalisées pour voir l'évolution le long de ce front de dégradation, ont montré une forte perte de propriétés locales malgré la formation des M-S-H.

En parallèle, une caractérisation des M-S-H a été réalisée sur des pâtes cohésives et pures de M-S-H afin d'acquérir les données de propriétés physiques et mécaniques intrinsèques aux M-S-H et ainsi pouvoir, *via* une modélisation chemo-mécanique à petite échelle, comprendre les mécanismes d'altération des propriétés des matériaux cimentaires exposés à ce type d'environnement.

## SUJET DE LA THÈSE

**Caractérisation des hétérogénéités hydriques et texturales des argiles gonflantes  
par la méthode de Polarisation Provoquée Spectrale (PPS) : application aux essais *in situ*  
de Modern2020 au Laboratoire de Recherche Souterrain à Tournemire**

Doctorant :	Jad EL ALAM
Date du début de la thèse :	04 / 01 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Pierre DICK
Directeur de thèse :	André REVIL - USMB
École doctorale :	Université de Savoie Mont-Blanc / SISEO
Financement de thèse :	IRSN

Bentonite clay seals are generally used as part of the engineered barrier to seal off the galleries and / or shafts leading to the surface in radioactive waste disposal facilities. Bentonite is selected mainly because of its low hydraulic permeability in a saturated state. This ensures that diffusion will be the dominant transport mechanism in the barrier.

Monitoring the bentonite's different petrophysical parameters through time thus appears as a key element in supporting post-closure safety, since one must ensure that these parameters evolve favorably towards an envisaged state.

However, monitoring bentonite could lead to technical issues such as a loss of confinement properties due to the presence of sensors within the seal. These problems could nevertheless be overcome using indirect methods such as geo-electrical methods. One of the most promising geo-electrical tools to monitor the evolution of bentonite is Electrical Resistivity tomography (ERT). This method: (i) can be used non-intrusively; (ii) is sensitive to parameters like water content, temperature and salinity; (iii) is able to monitor dynamic processes with time; (iv) can detect local anomalies that are missed by imbedded sensors.

It is the most common technique but only provides resistivity information at one frequency. Exploring the frequency spectrum via the Spectral Induced Polarization (SIP) method will yield additional information about the polarization processes (e.g. EDL, membrane and Maxwell-Wagner mechanisms) that occur within the material studied and about the chargeability of the medium, which is important in the case of clays since they are an electrically complex material. Polarization refers to the formation of local charge gradients when a current is applied and chargeability is related to the ability of the material to reversibly store electrical charge, which is displayed through the voltage decay that occurs when the primary current is shut down.

The general goals of the PhD are to determine the suitability of SIP for monitoring bentonite seals using a developed model that is validated at a mock-up scale and ultimately in field surveys at the Tournemire Underground Research Laboratory. When conducting tomographic field surveys, In-Phase and Quadrature conductivity data from 3D (or 4D) SIP field surveys can be translated into petrophysical and electrochemical parameters such as permeability, water content, cation exchange capacity, salinity and dry density (among others). Exploring this method in the context of radioactive waste disposal potentially allows for the development of a robust and non-intrusive monitoring technique for the sealing components of deep geological repositories.

## SUJET DE LA THÈSE

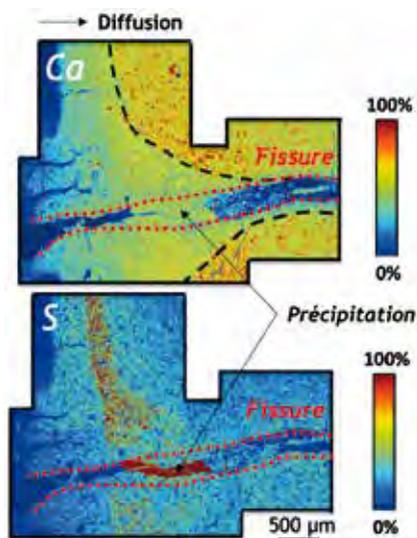
## Modélisation chemo-mécanique du comportement des bétons soumis à des réactions sulfatiques externes

Doctorante :	Julie POUYA
Date du début de la thèse :	04 / 11 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Mejdi NEJI - IRSN / Frédéric PÉRALÈS - IRSN
Directeur de thèse :	Laurent De WINDT - MINES ParisTech
École doctorale :	GRNE / MINES ParisTech
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre de la conception d'une installation de stockage réversible de déchets radioactifs (projet Cigéo) et de l'extension de la durée d'exploitation des centrales nucléaires, l'IRSN a mis en place des travaux de recherche pour étudier la durabilité des matériaux cimentaires constituant d'une part, les colis contenant les radionucléides et d'autre part, l'enceinte de confinement en béton armé des centrales nucléaires. Ces matériaux peuvent subir des dégradations susceptibles d'impacter leurs propriétés de confinement du fait de l'évolution de leur minéralogie et par conséquent, la modification de leur microstructure et des processus de diffusion au sein de la matrice cimentaire. L'IRSN s'intéresse en particulier aux réactions sulfatiques externes (RSE), pathologies entraînant la précipitation de cristaux d'ettringite et de gypse dans les pores du matériau, pouvant conduire à l'apparition de pressions de gonflement interne, altérant la durabilité du matériau cimentaire.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir la compréhension des mécanismes expansifs engendrés par la présence de sulfates en contact avec un matériau cimentaire. Des essais de dégradation de pâtes CEM I en milieu sulfaté sont réalisés et constituent une base de données expérimentale permettant de modéliser le transport réactif et la mécanique.

En premier lieu, une modélisation de la dégradation chimique de la pâte de ciment mise au contact d'un milieu sulfaté est réalisée. Les simulations sont effectuées avec le code de transport réactif HYTEC, afin d'estimer la minéralogie de l'échantillon et l'évolution de la porosité au cours du temps. Les propriétés mécaniques locales, associées à la précipitation et à la dissolution des minéraux, sont ensuite estimées par des méthodes d'homogénéisation analytique. Les profondeurs des fronts de dégradation et les propriétés mécaniques calculées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, révélant une nette diminution du module de Young (élasticité ou traction) dans la zone dégradée, en lien avec la décalcification du matériau.



En second lieu, l'impact de la présence de fissures sur la dégradation du matériau est étudié. Les analyses expérimentales de la dégradation d'échantillons pré-fissurés montrent d'une part, un élargissement des zones décalcifiées et enrichies en soufre à proximité de la fissure (figure 1) et d'autre part, une expansion mécanique induite par la précipitation des espèces minérales dans la fissure. Cette dernière est simulée en utilisant la plateforme numérique XPER, qui permet la modélisation de la propagation de la fissuration dans un milieu poreux discontinu.

Figure 1 – Cartes élémentaires MEB-EDS du calcium et du soufre d'une pâte de ciment pré-fissurée, après 4 mois de dégradation dans une solution de sulfate de sodium. L'échelle de couleur indique le pourcentage de ces éléments dans chaque pixel, de 0% en bleu à 100% en rouge.

## SUJET DE LA THÈSE

## Impact of saline and alkaline plumes on the swelling and self-sealing behavior of a damaged clay rock

Doctorante :	Yara BARAKAT
Date du début de la thèse :	13 / 01 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS-& ENPC / NAVIER
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	Yujun CUI - ENPC - Laboratoire Navier
École doctorale :	ENPC / SIE
Financement de thèse :	IRSN / FANC

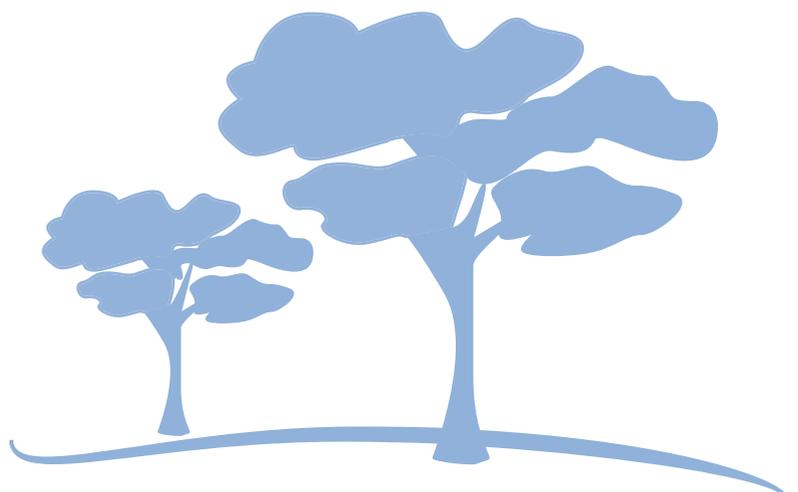
In many countries, deep geological repositories have been considered for the long term disposal of high level or intermediate level and long-lived (HL – or IL – LL) radioactive waste. Generally, a multi-barrier system is adopted. It consists of engineered barriers made of compacted bentonite-based materials confined by concrete structures and waste packages embedded in a clay host rock that acts as a geological barrier (Andra. 2016; SKB. 2001), due to its low hydraulic conductivity and high sorption capacity for most radionuclides (Andra, 1999; 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 used to support bentonite seals, 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 this context, an experimental research program was launched to study the impact of alkalinity on the swelling of the Opalinus Clay, considered as a potential host rock in Switzerland. Opalinus Clay samples, from the lower sandy facies of Mont Terri site, at an initial dry state, were exposed to synthetic water (pH = 7.5) or to a hyper-alkaline solution (NaOH, KOH, Ca(OH)<sub>2</sub>; pH = 13.5) at different water contents. At each water content, the sample's total volume was determined using kerdane method. It was found that the void ratio increases with increasing pH. In parallel, artificially cracked cylindrical samples of Opalinus Clay were subjected to a flow of synthetic water and hyper-alkaline solution in a constant volume cell. The radial swelling pressure was recorded using a total pressure sensor. It has been found that the swelling pressure increases with increasing alkalinity.

The two results presented above show a good agreement. Indeed, exposing Opalinus Clay to a hyper alkaline solution can initiate acid-base reactions concentrated at clay particles edges. An increase in the negatively charged groups occurs resulting in higher repulsive forces and in a face-to-face association of clay particles. The dispersed structure thus exhibits a higher porosity (higher void ratio) leading to an increase in the measured swelling pressure. Also, clay mineral dissolution and the precipitation of new minerals can occur. The volume occupied by the new precipitated minerals increases the sample's total volume, thus the radial swelling pressure. Finally, calcite and quartz dissolution did probably occur resulting in an increase in the total porosity.

## References

- Andra, 1999. Référentiel Géologique du site de l'Est. Rap. ADS-99-005, Andra, Chatenay-Malabry, France.
- Andra, 2005. Dossier 2005 Argille. Synthesis. Evaluation of the Feasibility of a Geological Repository in an Argillaceous Formation. Meuse / Haute-Marne site. Andra Report Series.
- Andra, 2016. Focus on the French Geological Disposal: The Cigéo Project. Atoms for future 27 June 2016, Paris.
- SKB, 2001. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. Technical Report TR-01-30 to RD & DProgramme, pp. 20–21.



## ➤ Mercredi 30 mars

13 h 45 - 15 h 05 Salle Kandinsky

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SÛRETÉ - MODÉLISATION DE L'INCENDIE ET DE L'EXPLOSION

**Présidente: Sophie TRÉLAT**

Chercheuse dans le Bureau d'étude et de modélisation des effets des armes et explosifs (PDS-DEND / SESN / BMAX)

**Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY** - Modelling of Combustion-Turbulence Interaction for the Simulation of Fires in Confined and Ventilated Environments.

**Jérémie JANIN** - Forçage volumique et lois de parois adaptatives pour un modèle de fermeture algébrique hybride RANS / LES.

**Aubin BRUNEL** - Schémas de convection pour les équations de Navier-Stokes sur maillages généraux.

**Raphaël GAVART** - Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type.

## SUJET DE LA THÈSE

Modelling of Combustion-Turbulence Interaction for the Simulation of Fires  
in Confined and Ventilated Environments

---

Doctorant :	Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSN-RES / SA2I / LIE & Institut P'
Tuteur de thèse :	Germain BOYER (IRSN) / Franck RICHARD (Institut P')
Directeur de thèse :	Arnaud MURA - Institut P'
École doctorale :	ENSMA - Poitiers / SIMME
Financement de thèse :	IRSN

---

In the context of nuclear safety, flames encountered in fires are primarily turbulent diffusion flames. In these flames, chemical reactions result from the micrometric scale molecular mixing of the fuel and the oxidizer. But the combustion kinetics and heat release are mainly controlled by the turbulent mixing since the chemical time scale is generally much shorter than the turbulent time scale. Therefore, the models used in fire dynamics simulation tools, such as the IRSN CALIF<sup>3</sup>S-ISIS software, are traditionally drawn under the infinitely fast chemistry assumption so that the reaction rate only depends on the turbulent time scale. However, these models suffer from several shortcomings:

- the infinitely fast chemistry assumption and the absence of chemistry modelling do not allow predicting intermediate combustion by-products, such as soot which plays a very important role in the radiative energy dissipation within the flame;
- since turbulent mixing is the rate-limiting process, some events such as extinction and re-ignition that may occur in confined-ventilated configurations are unpredicted.

In this context, we aim at gradually developing a turbulent combustion model that allows accounting for these phenomena, assuming fast but non-instantaneous chemistry.

Firstly, the chemical structure of the flame is studied separately from the turbulent flow. A set of 1D flamelets are computed using the Cantera software, and the resulting concentrations of fuel and oxidizer, but also intermediate species, are stored as a function of conserved laminar scalar functions, namely the mixture fraction and the associated scalar dissipation rate. Subsequently, this Laminar Flamelet Model (LFM) is used with the presumed Beta and Dirac probability density functions (PDFs) to map the laminar flame structure in the space of the turbulent filtered / averaged conserved scalars, namely the average and the variance of the mixture fraction and the average of the scalar dissipation rate. Consequently, the turbulent flame structure can be stored in a lookup table and directly used during the CFD computation without solving any other transport equation but the homogeneous ones for the conserved scalars. The resulting model has been verified by carrying out Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) simulations on a jet flame configuration (Sandia D Flame). As expected, the implemented model manages to predict the concentrations of main intermediate products such as carbon monoxide (CO). In the next steps of the thesis, the model will be validated by performing Large Eddy Simulations (LES) of jet flames, and of turbulent buoyant plumes that occur during fire scenarios.

## SUJET DE LA THÈSE

**Forçage volumique et lois de parois adaptatives pour un modèle de fermeture algébrique hybride RANS / LES**

Doctorant :	Jérémie JANIN
Date du début de la thèse :	18 / 11 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Fabien DUVAL
Directeur de thèse :	Christophe FRIESS / Pierre SAGAUT – M2P2
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN

L'étude des écoulements turbulents intéresse un grand nombre de domaines pour des problématiques de sûreté dans des situations aussi bien naturelles qu'industrielles. Dans le cadre des études de sûreté menées par l'IRSN, une problématique importante concerne le risque de déflagration dans les locaux où une source d'hydrogène est présente ainsi que dans l'enceinte de confinement lors d'un accident de fusion du cœur. Dans ces situations, le mélange turbulent des différentes espèces gazeuses joue un rôle déterminant sur les niveaux de concentration et donc sur le risque d'inflammation et d'explosion.

L'objectif de cette thèse s'inscrit dans un contexte plus général d'amélioration des prévisions des modèles de turbulence pour l'ensemble des applications de la plate-forme CALIF<sup>3</sup>S développée à l'IRSN (dispersion, déflagration, incendie, transport de polluant...). Il s'agit en particulier de poursuivre les développements menés pour les approches hybrides RANS / LES. Ces approches connaissent un intérêt grandissant en améliorant les performances prédictives des approches RANS tout en réduisant le coût des approches LES. L'essentiel du travail de thèse s'articule autour du développement d'une méthode de forçage volumique et de sa mise en œuvre dans un contexte hybride pour différents types d'écoulements (turbulence homogène, écoulements cisailés...) afin de décrire le plus correctement possible les zones de transition RANS / LES. Ces zones où le rapport entre énergie cinétique turbulente résolue et modélisée varie fortement correspondent typiquement à la zone en aval du cône inertiel d'un jet ou à la zone de proche paroi.

La méthode de forçage volumique développée dans ce travail est basée sur une approche d'enrichissement des échelles résolues. Dans les équations du mouvement résolu, cette approche revient à ajouter une vitesse synthétique à la vitesse résolue et à introduire des termes supplémentaires dits de forçage. Seuls les termes identifiés comme principalement responsables de la production d'énergie cinétique turbulente sont retenus. Ces termes sont paramétrés à partir de grandeurs statistiques cibles telles que l'énergie turbulente et l'échelle de longueur intégrale. La méthode de forçage proposée a dans un premier temps été mise en œuvre avec succès pour l'entretien d'une turbulence homogène isotrope. Dans un deuxième temps, l'intérêt et les potentialités de la technique de forçage ont été illustrés sur des simulations hybrides RANS / LES d'un jet plan représentatif d'une bouche de soufflage d'un local ventilé. Les travaux en cours visent à mettre en œuvre cette technique sur des configurations d'écoulement du programme expérimental CARDAMOMETTE mené à l'IRSN où les effets de paroi sont pris en compte par une approche de type pondération elliptique.

## SUJET DE LA THÈSE

## Schémas de convection pour les équations de Navier-Stokes sur maillages généraux

Doctorant :	Aubin BRUNEL
Date du début de la thèse :	27 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Jean-Claude LATCHÉ
Directeur de thèse :	Raphaèle HERBIN - CNRS
École doctorale :	AMU / École Doctorale en Mathématiques et Informatique de Marseille
Financement de thèse :	CNRS / IRSN

Les équations classiques de la mécanique des fluides, comme les équations de Navier-Stokes, permettent de décrire différents types d'écoulements observés dans de nombreux phénomènes, comme les incendies dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement ou les déflagrations turbulentes. L'étude de ces événements et de leurs conséquences est au cœur de la recherche en matière de sûreté nucléaire menée au sein du laboratoire d'étude de l'Incendie et l'Explosion (LIE) de PSN-RES. Ce dernier développe dans ce cadre les logiciels ISIS (simulation de l'incendie) et P<sup>2</sup>REMICS (explosion), sur la base de la plate-forme de composants logiciels du laboratoire, CALIF<sup>3</sup>S.

La thèse a pour objectif de développer des schémas numériques dans la plate-forme CALIF<sup>3</sup>S venant compléter ou améliorer les algorithmes existants. Ces schémas s'appliquent à tous les régimes d'écoulements (incompressibles ou compressibles), et fonctionnent pour des maillages très généraux, permettant de traiter des domaines de géométrie complexe. Intégrés dans CALIF<sup>3</sup>S, ils sont basés sur des discrétisations en espace telles que déjà mises en œuvre dans la plate-forme, dites à mailles décalées : pour des raisons de stabilité, les inconnues scalaires comme la masse volumique ou la pression sont associées aux centres des cellules tandis que les vitesses sont associées aux faces. Ceci rend la discrétisation de certains termes des équations de Navier-Stokes particulièrement technique.

Une première étape a consisté à développer une approximation de type volumes finis de l'opérateur de convection pour l'équation de la quantité mouvement permettant de traiter des mailles en forme de prismes et de pyramides, souvent utilisées pour la construction du maillage dans les cas difficiles par les maillages tri-dimensionnels usuels. Deux critères étaient à respecter : la précision et la stabilité. Ils sont remplis par la solution proposée : l'approximation est d'ordre deux en espace et en temps, et un équivalent discret de l'équation de bilan d'énergie cinétique est satisfait. Les tests numériques effectués montrent l'efficacité de cette discrétisation pour tous les régimes d'écoulements.

En ce moment, un travail en cours est mené pour obtenir des discrétisations de l'opérateur de diffusion sur ces mêmes types de mailles. Ceci nécessite en préalable l'analyse théorique des discrétisations basées sur des éléments finis non-paramétriques, sujet peu traité, et de manière incomplète, dans la littérature.



Écoulement obtenu lorsqu'un choc de pression violent heurte un cylindre

## SUJET DE LA THÈSE

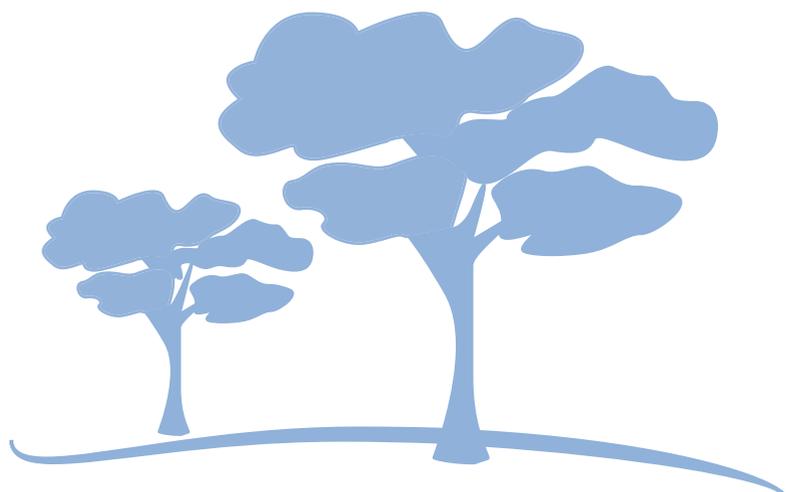
**Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc  
autour de structures type**

Doctorant :	Raphaël GAVART
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2020
Laboratoire :	DEND / SESN / BMAX
Tuteur de thèse :	Michel-Olivier STURTZER (ISL)
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX (CNRS Orléans) / Sophie TRELAT
École doctorale :	Université d'Orléans / Énergie - Matériaux - Sciences de la Terre et de l'Univers
Financement de thèse :	IRSN / ISL

De nos jours, les conflits armés, le terrorisme et les accidents industriels sont des préoccupations importantes pour les États et les personnes. Ainsi, plusieurs entreprises, publiques ou privées, travaillent au développement d'outils analytiques et numériques pour évaluer les conséquences des actions malveillantes sur les infrastructures et les personnes. Ces évaluations nécessitent des modélisations couplant mécanique des fluides et structures. Ces modèles doivent être validés par des expériences réalisées à différentes échelles, les expérimentations à échelle réelle étant difficilement réalisables. Les activités de R&D développées par l'IRSN, au sein du bureau BMAX, visent, entre autres, à améliorer la connaissance des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle tridimensionnelle et des obstacles de formes variées, et des chargements mécaniques résultants dans le but de développer des modèles simplifiés utiles à l'expertise. Cette thèse fait partie de la coopération scientifique avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), dont les recherches comprennent le développement d'équipements de protection pour les personnels, véhicules et infrastructures.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la continuité des activités développées à la DEND ayant pour objectifs (i) d'améliorer la connaissance des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle et des obstacles indéformables, et (ii) d'évaluer les profils temporels de pression à l'aide de diagnostics expérimentaux précis. Les expériences sont menées dans des installations à deux échelles distinctes : (i) échelle réduite sur la table à détonation de l'IRSN, (ii) échelle double sur la dalle d'essai à l'ISL.

Au cours de cette première année, l'interaction entre une charge d'Hexomax et une maquette hémicylindrique rigide a été examinée aux deux échelles. Les résultats de mesures de surpression à la surface de l'obstacle ont permis d'étendre l'approche du Modèle S décrit par Trélat et al. (2020). L'influence d'un second obstacle hémicylindrique au voisinage du premier a ensuite été investiguée à échelle double à l'ISL. Des essais de calibration des capteurs de pression ont été réalisés à l'ICARE. Finalement un outil numérique de reconstitution d'images (en cours de développement) permet d'assembler les prises de vue réalisées au cours de différents essais et ainsi de proposer une vision globale du contournement de l'onde à haute résolution. La suite des travaux comprend une nouvelle campagne d'essais à échelle réduite à l'IRSN prévue en septembre 2022 pour confirmer les observations faites à l'ISL ainsi qu'une réflexion quant à l'influence de la déformation du matériau de la maquette sur le flux aérodynamique autour de celle-ci ainsi que le chargement mécanique consécutif.



## ➤ Mercredi 30 mars

15h30 - 16h50 Salle Renoir / Matisse

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ENVIRONNEMENT - TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES

**Président: François PAQUET**

Chef du Service d'expertise et d'étude en radioprotection des populations et de la radioactivité dans l'environnement (SEREN)

**Thomas SEYER** - Ecosystem modelling in the North-Western Mediterranean Sea: structure and functioning of a complex system.

**Déo-Gratias Kily SOURABIE** - Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie.

**Dina OKHRIMCHUK** - Study of the long-term behaviour of  $^{137}\text{Cs}$  atmospheric fallouts in French forests.

**Nathan BODEREAU** - Sources et comportement du  $^{14}\text{C}$  dans un fleuve nucléarisé : le cas du Rhône aval.

## SUJET DE LA THÈSE

Ecosystem modelling in the North-Western Mediterranean Sea:  
structure and functioning of a complex system

Doctorant :	Thomas SEYER
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Tuteur de thèse :	Sabine CHARMASSON
Directeur de thèse :	Sabine CHARMASSON - IRSN
École doctorale :	AMU / Sciences de l'environnement : Géosciences
Financement de thèse :	IRSN / PACA

The gulf of Lion (GoL) in the NW Mediterranean Sea, a highly productive area mainly related to the Rhône River inputs, is intensively exploited by French and Spanish fisheries. Major changes in term of biomass and catches occurred in the GoL in the last decade. This study presents an updated and improved Ecopath model for the continental shelf (0-200 m) of this area called GOLE4M. The parametrization and calibration of the model focused on 2010-2014 field data.

It includes 66 functional groups (formed from 200 pelagic and benthic species / groups) representing 99% of the estimated biomass and 97% of the estimated catches in this area. The species composition (number of species) includes 52% fishes, 16% mollusks, 8% crustaceans and 8% echinoderms (plus others). The biomasses were estimated from 3 datasets (including MEDITS and PELMED campaigns) depending on their relevance for each species. This work has benefited from recent data on the hitherto rather neglected benthos (REDIT2010 and APPEALMED campaigns). Fisheries captures, mainly based on SIH data, were detailed for 7 gear types (benthic trawls, pelagic trawls, nets, seines, long lines, recreational fishing and others). They also include estimated corrections for unreported and recreational catches, as well as discards.

Once balanced, the model includes 5 trophic levels (TL) with *Prionace glauca* the highest TL (5.2). Benthic and demersal invertebrates presented the highest biomass in the system (45.7%), followed by vertebrates (23.7%) and plankton groups (22.7%). However, related to their high productivity, the phytoplankton groups were the most consumed (54.5%), followed by the zooplankton groups 9.5%, the invertebrates groups 11.1% and fishes 0.7%. Among fishes, the most consumed species in the food web were, *Sardina pilchardus*, *Sprattus sprattus* and *Engraulis encrasicolus* (cumulated consumption 47.4%). The most exploited species by fisheries were *Sparus aurata* (8.9%), *Merluccius merluccius* (8.2%) and *E. encrasicolus* (8.1%). Crustivorous fishes 2, squids and *Conger conger* appeared as keystone species. Marine birds and *Dicentrarchus labrax* have the highest omnivory index (1.6 and 1.1, respectively). The majority of the flows occurs at the TL II which host 35.7% of the total throughput. However, the highest part of the export, dominated by the catches, comes from TL III and IV, with a mean TL of the catches of 3.36. The integrated pedigree routine gives an overall score 0.63, which places this model in the upper part of the range for data quality.

## SUJET DE LA THÈSE

## Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie

Doctorant :	Déo-Gratias Kily SOURABIE
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Tuteur de thèse :	Didier HEBERT
Directeur de thèse :	Denis MARO - IRSN
Co-directeur de thèse :	Lucilla BENEDETTI - CEREGE
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Le chlore 36 ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $T_{1/2} = 301\,000$  ans) est un radionucléide d'origine naturelle et artificielle susceptible d'être rejeté accidentellement lors des opérations de démantèlement des centrales nucléaires ou chroniquement lors du retraitement des combustibles irradiés. Une fois émis dans l'atmosphère, le  $^{36}\text{Cl}$  (gaz et particules) peut être transféré vers le sol par des dépôts secs et humides. Cependant, les connaissances sur ces dépôts sont très parcellaires<sup>[1]</sup>. Or, du fait de sa mobilité et de sa biodisponibilité importante, le  $^{36}\text{Cl}$  est un radionucléide dont l'étude du devenir dans l'environnement constitue un enjeu pour les études d'impacts<sup>[2]</sup>.

Ainsi, l'objectif de la thèse est la quantification puis la modélisation des dépôts secs et humides de  $^{36}\text{Cl}$  sur une prairie en fonction des paramètres atmosphériques. Le végétal étudié est l'herbe car constituant un maillon de la chaîne alimentaire de l'homme via le lait de vache.

Pour répondre à cet objectif, une méthode d'extraction du chlore contenu dans les feuilles des plantes, les filtres aérosol et le charbon actif a été développée. Elle consiste à passer sous haute température l'échantillon sec en présence d'hydroxyde de sodium. Elle a été validée par des standards NIST de feuilles avec un rendement d'extraction massique moyen en chlorures de  $84 \pm 5\%$ .

Pour la détermination des vitesses de dépôts secs, 1m<sup>2</sup> d'herbe a été installé chaque 2 semaines sur le site de la plateforme technique IRSN La Hague (PTILH) située à 2 km de l'usine Orano-la Hague, émetteur chronique du  $^{36}\text{Cl}$  en faible quantité. Un abri mobile automatique recouvrait l'herbe lors d'épisodes pluvieux. A proximité de l'herbe, le chlore gazeux a été prélevé par un AS3000 contenant une cartouche de charbon actif et le chlore particulaire sur un filtre composite téflon et fibre de verre. La mesure du chlore 36 est réalisée en spectrométrie de masse par accélération ASTER au CEREGE. Tous les échantillons ont été préparés chimiquement afin d'éliminer le soufre 36 (interfèrent isobarique) et de récupérer les chlorures sous forme de pastilles de chlorure d'argent. Les résultats des 3 premières campagnes montrent un flux de dépôt sec moyen de  $^{36}\text{Cl}$  sur l'herbe de  $380 \pm 92 \text{ at.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  avec une vitesse de dépôt sec  $vd(\text{gaz+particules}) = 4,2.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ . Par la suite, des expérimentations seront effectuées sur les dépôts humides puis une modélisation des dépôts secs et humides sera réalisée en tenant compte des paramètres liés au couvert et à la turbulence atmosphérique.

[1] Le Dizès, S., Gonze, M.A., 2019. Behavior of  $^{36}\text{Cl}$  in agricultural soil-plant systems: a review of transfer processes and modelling approaches. *J Environ Radioact* 196:82–90

[2] Pupier, J, Benedetti, L, Bouchez, C, Bourles, D, Leclerc, E, Thiry, T, Guillou, V, ASTER Team. 2016. Monthly record of the Cl and  $^{36}\text{Cl}$  fallout rates in a deciduous forest ecosystem in NE France in 2012 and 2013. *Quaternary Geochronology* 35 p.26-35.

## SUJET DE LA THÈSE

Study of the long-term behaviour of  $^{137}\text{Cs}$  atmospheric fallouts in French forests

Doctorante :	Dina OKHRIMCHUK
Date du début de la thèse :	08 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LR2T
Tuteur de thèse :	Pierre HURTEVENT / Marc-André GONZE
Directeur de thèse :	Marie SIMON CORNU – IRSN
Co-directeur :	Anne PROBST – LEFE
École doctorale :	Université d'Aix-Marseille / Sciences de l'environnement : Géosciences
Financement de thèse :	IRSN

Forests are known to be sinks of atmospheric pollutants due to the high capture efficiency of their canopies and ability to recycle chemical elements in the long-term. Among them is  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=30\text{yrs}$ ), which settled in French forests after atmospheric nuclear weapon testing (1945-1980) and the Chernobyl accident (1986). Progressively,  $^{137}\text{Cs}$  was incorporated in the biogeochemical cycle (BGC) of its chemical stable analogues (K,  $^{133}\text{Cs}$ ), which led to its persistence in these ecosystems. The dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  fluxes in forests at short and mid-terms (10-15yrs) after deposition were well described using datasets from Japanese forests contaminated by the Fukushima accident, but its long-term behaviour remains uncertain. Other types of forest and environmental conditions should also be assessed.

To address these issues, we rely on the BGC of  $^{137}\text{Cs}$  and its chemical analogues, which includes 2 transfer processes to meet the requirements of trees for maintaining annual growth, root uptakes and internal translocations. To assess these fluxes, initial datasets were obtained by sampling 3 contrasted forest stands monitored by RENECOFOR (ONF): HET64 (European beech; Ance (64)), CPS77 (English and Sessile oaks; Fontainebleau (77)) and PS67a (Scots pine; Haguenu (67)).

Estimated beech tree biomasses show that wood contributes the most to tree biomass, accounting for 56% of total tree biomass, followed by branches with 31%. The lowest biomass contribution belongs to the bark (12%) and leaves (1%). Measured concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  (Bq / kg DW) in HET64 ( $n=6$  / site) for wood, branches, bark and leaves are 0.6, 0.1, 0.3 and 0.2, respectively. In CPS77 ( $n=4$  / site) for the same organs these concentrations are 0.8, 1.0, 0.9 and 0.003, respectively. For needles measured in PS67a ( $n=4$  / site), the result is 1.1 Bq / kg (the other results are pending). The results show differences in  $^{137}\text{Cs}$  concentrations among tree species. Most of  $^{137}\text{Cs}$  stocks (kBq /  $\text{m}^2$ ) were found to be in soils (about 97% of the total  $^{137}\text{Cs}$  stock), which are 2.8 in cambisol from HET64, 1.6 and 3.2 in podzols from CPS77 and PS67a, respectively. Comparison of stands by normalizing  $^{137}\text{Cs}$  content by the soil stocks ( $\text{m}^2 / \text{kg} \times 10^{-4}$ ) in wood is 0.3-2 for beeches and 2.5-4.3 for oaks. Beeches were also sampled in CPS77 and PS67a ( $n=2$  / site) but they did not exhibit the same normalized concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ , which are 2.2-4 and 8 (only one result), respectively. Significant variability of results is observed between the same species in different stands. This indicates the influence of the site on the redistribution of  $^{137}\text{Cs}$ .

## SUJET DE LA THÈSE

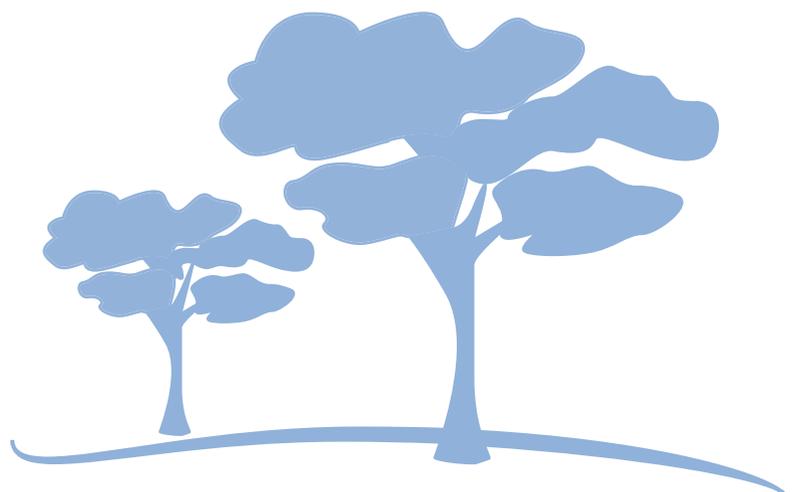
Sources et comportement du  $^{14}\text{C}$  dans un fleuve nucléarisé : le cas du Rhône aval

Doctorant :	Nathan BODEREAU
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Directeur de thèse :	Frédérique EYROLLE
Co-directeur de thèse :	Yoann COPARD – Université Rouen-Normandie
École doctorale :	Université Aix-Marseille / Sciences de l'Environnement : Géosciences
Financement de thèse :	IRSN

Le  $^{14}\text{C}$  est un isotope radioactif du Carbone d'origine naturelle mais aussi anthropique provenant notamment des rejets des installations nucléaires dans l'environnement. Des concentrations de  $^{14}\text{C}$ , 2 à 3 fois supérieures aux teneurs naturelles ( $226 \text{ Bq kgC}^{-1}$ ), ont été enregistrées dans les sédiments et les poissons en aval des fleuves nucléarisés (e.g., Rhône). Malgré sa faible radiotoxicité, des travaux de thèse au sein de notre service ont démontré qu'une part non négligeable peut persister au sein de la faune aquatique (e.g., *Cyprinus carpio*) après ingestion. La problématique est que le  $^{14}\text{C}$  aquatique rejeté se répartit au sein de différentes fractions de carbone selon de nombreux mécanismes biogéochimiques rendant son devenir complexe. Ainsi, définir les principales caractéristiques des mécanismes de transfert du  $^{14}\text{C}$  dans l'environnement demeure un grand défi.

Cette thèse s'appuie sur l'acquisition de données de terrain, au cours d'une année, à l'exutoire du Rhône nucléarisé (France), et de deux de ses affluents (Durance et Ardèche). Des analyses de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  sont effectuées dans les fractions de carbone organique dissous (DOC), de carbone inorganique dissous (DIC) et de carbone organique particulaire (POC) ainsi que de nutriments. Des mesures de tritium ont été effectuées simultanément dans des échantillons d'eau filtrée afin d'enregistrer le marquage par les industries nucléaires.

Les comparaisons de  $^{14}\text{C}$  du Rhône avec les données des affluents mais aussi la littérature (i.e., échelle mondiale) mettent en évidence un écart en  $^{14}\text{C}$  en particulier dans les fractions POC et DIC avec des signatures pouvant atteindre  $600 \text{ Bq kgC}^{-1}$ . Le nombre restreint de valeurs pour le DOC du Rhône montre des signatures plus appauvries que le POC et le DIC mais ne peut attester d'une non-contribution des rejets nucléaires au sein de cette fraction à ce stade de l'avancée des travaux. En étiage, les signatures importantes de  $^{14}\text{C}$ -POC et  $^{14}\text{C}$ -DIC avec des teneurs élevées en tritium confirment une contribution des rejets des installations nucléaires. Les concentrations élevées de Chlorophylle A corrélées aux fortes signatures  $^{14}\text{C}$ -POC montrent un enrichissement artificiel lorsque la photosynthèse aquatique est importante : le  $^{14}\text{C}$  rejeté sous forme essentiellement DIC (~93 %) est assimilé par la production primaire (e.g., algues) au cours de leur développement et intègre, à son tour, la fraction POC autochtone, base de la chaîne trophique. Les analyses complémentaires sur la fraction DOC, en cours d'acquisition, permettront de déterminer si le  $^{14}\text{C}$  artificiel affecte l'ensemble du cycle du  $^{14}\text{C}$  naturel.



## ➤ Mercredi 30 mars

15h30 - 16h30 Salle Riviera

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SANTÉ - ÉPIDÉMIOLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS

**Présidente: Marie-Odile BERNIER**

Chercheure en épidémiologie (PSE-SANTE / SESANE / Lepid)

**Anaïs FOUCAULT** - Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition médicale diagnostique aux rayonnements ionisants pendant l'enfance, au sein de la cohorte « Enfant Scanner ».

**Mohamed Yassir ERRAHMANI** - Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein.

**Julie LOPES** - Analyse du risque radio-induit de décès par cancer chez les personnels médicaux exposés aux rayonnements ionisants.

## SUJET DE LA THÈSE

**Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition médicale diagnostique  
aux rayonnements ionisants pendant l'enfance, au sein de la cohorte « Enfant Scanner »**

Doctorante :	Anaïs FOUCAULT
Date du début de la thèse :	09 / 12 / 2019
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Sophie ANCELET
Directeur de thèse :	Marie-Odile BERNIER - IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay / EDSP
Financement de thèse :	IRSN

Les évolutions technologiques favorisent la multiplication des actes diagnostiques utilisant les rayonnements ionisants (RI). De plus, il a été montré que les enfants présentaient une radiosensibilité accrue pour 25% des cancers<sup>[1]</sup>. Dans ce contexte, le laboratoire d'épidémiologie des RI de l'IRSN a mis en place la cohorte « Enfant Scanner », qui inclut les patients exposés à un scanner pour une pathologie non cancer avant l'âge de 10 ans, entre 2000 et 2011 dans l'un des 21 CHU participant. Une précédente analyse, réalisée sur un échantillon de 67 000 enfants suivis jusqu'en 2011, a montré une augmentation de risque, non significative, de leucémie et de tumeur cérébrale associée à la dose cumulée<sup>[2]</sup>. Cependant, le manque de puissance statistique ainsi que la non prise en compte des incertitudes dosimétriques et des risques compétitifs dans cette analyse limitaient la portée des résultats. L'objectif de la thèse est de pallier ces différentes limites afin d'affiner les estimations de risques.

Un premier travail a consisté à intégrer 40 000 enfants supplémentaires dans les analyses et à individualiser les cas de cancers incidents jusqu'en 2016. L'effet de l'exposition aux RI sur les risques instantanés de survenue de cancers a été estimé avec des modèles de Cox. Chez les enfants sans facteur de prédisposition au cancer, une augmentation significative du risque de tumeur cérébrale et de leucémie a été observée quand la dose cumulée au cerveau et à la moelle osseuse respectivement augmentait. Pour les lymphomes, aucune augmentation de risque n'a été mise en évidence.

Actuellement, nous cherchons à évaluer l'impact de la prise en compte des incertitudes dosimétriques sur l'estimation des relations dose-réponse. Des données du PACS (*Picture Archiving and Communication System*) collectées dans 8 CHU ont permis de modéliser l'incertitude relative à chaque paramètre utilisé pour estimer les doses à l'organe. Un modèle hiérarchique bayésien a été proposé pour prendre en compte différentes sources d'incertitudes dosimétriques dans les estimations de risques.

Parallèlement, nous cherchons à estimer l'effet de l'exposition aux RI sur la probabilité de survenue de chaque cancer d'intérêt. L'existence d'événements compétitifs doit être prise en compte afin d'éviter tout biais d'estimation. Les approches actuelles sont peu adaptées à des situations où le risque de pathologie est faible et les expositions variables dans le temps. Aussi, nous proposons une approche originale basée sur l'inférence bayésienne d'un mélange de modèles de survie dont chaque composante est associée à l'occurrence d'un événement compétitif.

[1] UNSCEAR. Annex b: Effects of Radiation Exposure of Children. United Nations, 2013.

[2] Thèse de N. Journy, soutenue le 14 novembre 2014 (Université Paris Sud).

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein

Doctorant :	Mohamed Yassir ERRAHMANI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Sophie JACOB
Directeur de thèse 1 :	Marie Odile BERNIER – IRSN
Directeur de thèse 2 :	Jean FERRIERES – INSERM UMR1027 Toulouse
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Santé Publique
Financement de thèse :	Contrat doctoral Université Paris-Saclay

La radiothérapie (RT) constitue un traitement majeur du cancer du sein (CS). Cependant, plusieurs études ont mis en évidence une association avec la survenue de maladies cardiovasculaires à moyen, court et long terme. Néanmoins, les données spécifiques concernant les arythmies cardiaques et troubles de la conduction sont rares.

Dans ce contexte, le but de cette thèse est d'étudier si la RT pour un CS est associée à un risque accru d'arythmies cardiaques et troubles de la conduction à moyen ou long terme (2-10 ans), ainsi que d'étudier l'association entre ce risque d'arythmie et la dose de radiation absorbée par le cœur et les sous-structures cardiaques.

Cette thèse est divisée en trois parties :

- 1 - évaluer si l'incidence d'arythmie cardiaque caractérisée par l'implantation d'un pacemaker (PM) chez les patientes traitées par RT pour un CS est plus élevée que dans la population générale.
- 2 - étudier la relation dose-réponse entre le risque d'arythmies cardiaques et la dose absorbée par le cœur et ses sous-structures (ventricules et oreillettes) au cours d'une radiothérapie.
- 3 - réaliser une étude descriptive de la dosimétrie des foyers arythmogènes (nœuds sinoatrial et atrioventriculaire) et leur corrélation avec les doses des sous-structures cardiaques (cœur, ventricules et oreillettes), puis évaluer l'intérêt de la dosimétrie des nœuds dans l'étude de la relation dose-réponse avec les arythmies.

Une première étude a été réalisée à partir de données médico-administratives de l'Echantillon Généraliste de Bénéficiaire – EGB du SNDS. Les données de près de 3 500 patientes traitées pour un CS (dont 80% traitées par RT) entre 2008 et 2016 ont été analysées pour comparer le nombre de cas incidents de PM observés dans le groupe RT au nombre attendu en population générale (Errahmani et al., *IJC Heart and Vasculature* 2022).

Une étude cas-témoins nichée de 116 patientes françaises traitées par RT pour un cancer du sein 2009-2013, suivies jusqu'en 2019, est en cours d'analyse pour étudier la relation dose-réponse entre la survenue d'une arythmie (identifiée à partir de questionnaires renseignés par les médecins traitants des patientes) et les doses au niveau du cœur, des ventricules et des oreillettes.

Enfin l'étude dosimétrique des foyers arythmogènes des patientes de l'étude cas-témoins a commencé en janvier. L'analyse descriptive et les corrélations entre les différentes doses sera prochainement réalisée. Enfin la dosimétrie des nœuds sera intégrée dans l'analyse de la relation dose-réponse.

## SUJET DE LA THÈSE

## Analyse du risque radio-induit de décès par cancer chez les personnels médicaux exposés aux rayonnements ionisants

Doctorante :	Julie LOPES
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Clémence BAUDIN
Directeur de thèse :	Marie-Odile BERNIER - IRSN
École doctorale :	Université Paris Saclay / Santé Publique
Financement de thèse :	IRSN

Les études portant sur les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (RI) (travailleurs de l'industrie nucléaire ou du secteur médical, personnels navigants) permettent d'étudier des expositions chroniques à faibles doses, représentant les modes d'exposition les plus fréquents de la population générale. Actuellement, le personnel médical constitue le plus grand groupe de travailleurs exposés professionnellement à des sources artificielles de RI. Le risque de diverses pathologies associé à ces expositions chroniques à de faibles doses fait encore l'objet de débats chez ces professionnels, notamment leur risque de développer des tumeurs du système nerveux central (SNC).

Dans ce contexte, l'IRSN a mis en place une cohorte de professionnels du secteur médical exposés aux RI, la cohorte ORICAMS (Occupational Radiation-Induced Cancer in Medical Staff), incluant 126 960 travailleurs suivis entre 2002 et 2012 dans SISERI, le registre national de surveillance de l'exposition des travailleurs aux RI. En s'appuyant sur les données de cette cohorte, l'objectif de la présente thèse est d'évaluer le risque de mortalité toutes causes confondues et par cause spécifique chez les travailleurs du secteur médical exposés aux RI en France, en portant une attention particulière aux tumeurs du SNC.

Au cours du premier axe de cette thèse, deux revues systématiques de la littérature, accompagnées de méta-analyses, sur les risques de développer des tumeurs du SNC (1<sup>ère</sup> revue, soumise) ou des maladies non-cancéreuses du SNC (2<sup>ème</sup> revue, en cours de relecture) suite à une exposition à de faibles doses de RI au cours de l'âge adulte ont été réalisées. Le deuxième axe de cette thèse, actuellement en cours, vise à analyser la mortalité des professionnels du secteur médical inclus dans la cohorte ORICAMS, en comparaison avec celle de la population générale, en calculant des SMR (*Standardized Mortality Ratio*) (article en cours de rédaction). Le troisième axe consistera à estimer le risque de décès par tumeur du cerveau, avec quantification de la relation dose-réponse et évaluation de l'existence de facteurs confondants éventuels (âge à l'exposition, sexe, type d'emploi) par le biais d'une étude cas-témoins nichée dans la cohorte ORICAMS, et par une analyse conjointe avec les données de cohortes américaine et coréenne.

La finalité de ce travail permettra d'améliorer la connaissance des risques sanitaires radio-induits à faibles doses chez les travailleurs du secteur médical et, *in fine*, aider à l'amélioration des normes de radioprotection pour cette population de travailleurs.

## ➤ Mercredi 30 mars

15h 30 - 16h 55 Salle Kandinsky

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ SÛRETÉ - PHÉNOMÈNES THERMOCHIMIQUES EN SITUATION ACCIDENTELLE

**Président: Marc BARRACHIN**

Adjoint au chef du Service des accidents majeurs (PSN-RES / SAM)

**Elouan LE FESSANT** - Étude expérimentale du rôle du bore sur la revaporisation de dépôts de produits de fission.

**Sandra GYASI** - Study of the zirconium impact on the vaporization of the SIC rods under accidental conditions.

**Jinjiang CUI** - Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF (Accident Tolerant Fuel).

**Coralie LE MAOUT ALVAREZ** - Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en solutions tamponnées.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale du rôle du bore sur la revaporisation de dépôts de produits de fission

Doctorant :	Elouan LE FESSANT
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Anne-Cécile GREGOIRE
Directeur de thèse :	Jean-François PAUL / UCSS
Co-directrice :	Anne-Sophie MAMEDE / UCSS
École doctorale :	Université de Lille / Science de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / OCDE (Projet ESTER)

Lors d'un accident grave dans un réacteur nucléaire de nombreux Produits de Fission (Cs, I, Te...) ainsi que des éléments constitutifs des barres de contrôle (Cd, B...) peuvent être relâchés depuis le cœur et transportés dans le Circuit Primaire (CP). Selon leur volatilité, ces éléments sont en partie déposés dans le CP, le reste étant transféré dans l'enceinte de confinement. Ces dépôts peuvent constituer des sources potentielles de rejets différés, comme cela a été établi dans le cadre des analyses de l'accident de Fukushima Daiichi.

Cependant, le domaine de qualification des outils de simulation utilisés pour l'estimation de tels rejets différés nécessite d'être complété <sup>[1]</sup>.

Une première étude a été initiée à l'IRSN (2014-2017 <sup>[2]</sup>) visant à évaluer le potentiel de revaporisation de CsI et notamment la production d'iode gazeux. Cette étude a permis de proposer un premier mécanisme possible pour cette revaporisation <sup>[3]</sup>.

Mes travaux (réalisés dans le cadre du projet OCDE / NEA / ESTER) visent à déterminer et à affiner les mécanismes de revaporisation des dépôts d'iode. Pour cela, une étude paramétrique sur l'influence de la température, de la composition du gaz porteur (air / H<sub>2</sub>O / H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), du temps de séjour et de la présence d'autres PF a été réalisée sur :

- (i) des aérosols à base d'iode (CsI, CdI<sub>2</sub>) ;
- (ii) des aérosols de tellure (dont plusieurs isotopes sont précurseurs d'iode par décroissance radioactive).

Grâce à une nouvelle configuration expérimentale couplée à l'analyse ICP-MS et aux caractérisations de surface ToF-SIMS et XPS, la spéciation de la revaporisation des dépôts de Cs, Cd, I et Te est étudiée de manière quantitative.

Les expérimentations réalisées montrent que la revaporisation du CsI ainsi que la proportion d'iode gazeux augmentent fortement avec la température et la présence d'oxygène, phénomène observée même à faible teneur en O<sub>2</sub>. En revanche le temps de séjour, la présence d'un excès de césium (dépôt mixte CsI / CsOH) ou la présence de bore ne semble pas influencer la revaporisation ou la spéciation de l'iode revaporisée. Il a aussi été observé que la température de revaporisation de CdI<sub>2</sub> est plus basse que celle de CsI avec une proportion d'iode gazeux bien plus forte. Pour ces deux espèces, une interprétation plus précise est en cours à l'aide de calculs thermochimiques (*via* le logiciel NucleaToolbox <sup>[4]</sup>) afin de proposer un mécanisme réactionnel.

Enfin, la revaporisation de dépôts de tellure (acide tellurique) est en cours. Par la suite, d'autres dépôts (oxyde mixte Te-Cs, tellure de césium) ainsi que celle de dépôts mixtes de Te / CsI seront considérés.

[1] Cousin F. et al, NURETH-18, 2019, 1119-1132.

[2] Thèse de l'Université de Lille de D. OBADA, soutenue le 04 décembre 2017.

[3] Obada, D. et al., J. Hazard. Mater., 2020, 124519

[4] B.Piar, *NucleaToolbox 1.3 User's Manual*, Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire, IRSN, 2016.

## SUJET DE LA THÈSE

Study of the zirconium impact on the vaporization of the SIC rods  
under accidental conditions

Doctorante :	Sandra GYASI
Date du début de la thèse :	15 / 12 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN
Directeur de thèse :	Pierre BENIGNI- CNRS
École doctorale :	Université d'Aix Marseille / Physique et sciences de la matière
Financement de thèse :	IRSN

This research is related to the source term determination under severe accident conditions in French nuclear power plants, and more specifically with regard to the evaluation of fission products, such as iodine, having significant radiological consequences in short and medium term. During an accident, the Ag-In-Cd control rods and the zircaloy guide tubes are exposed to high temperatures, leading to formation of mixtures and partial vaporization of silver and cadmium known to strongly impact iodine speciation and transport in the reactor primary circuit. Considering these reasons, the investigation of the thermodynamic study of the Ag-In-Zr-O quaternary system is necessary. Such study requires to firstly investigate the binary sub-systems and finally the ternary ones. Among the binaries, In-Zr remains largely unknown. The aim of the thesis is to bring forth an experimental contribution to the thermodynamic study of the In-Zr and then Ag-In-Zr systems at high temperature.

In-Zr pellets of compositions ranging from 0 to 40 at%Zr were prepared in a glove box. Selected alloys (20-40 at%Zr) were heat-treated in the range from 200 to 1000°C for up to 2 months. They were analyzed by scanning electron microscopy and x-ray diffraction to identify the phases and measure their compositions. The  $\alpha\text{In}_3\text{Zr}$ ,  $\beta\text{In}_3\text{Zr}$ ,  $\text{In}_2\text{Zr}$  and  $\text{InZr}$  phases identified in these alloys were in agreement with data reported by Schubert et al. Further analysis done with electron probe micro analyzer, showed that equiatomic compounds ( $\text{InZr}$ ) are more sensitive to oxygen compared to the other phases. The temperature for the peritectic decomposition of  $\beta\text{In}_3\text{Zr}$  and  $\text{In}_2\text{Zr}$  phases were found to be  $593.7 \pm 1.1$  °C and  $1132.9 \pm 0.7$  °C respectively by using differential thermal analysis (DTA). Bi-DTA performed on the samples with composition 0 to 10 at%Zr, suggest that the samples containing less than 25 at%Zr undergo a peritectic transformation,  $(\text{In}) \leftrightarrow \alpha\text{In}_3\text{Zr} + \text{Liquid}$  at  $156.8 \pm 0.3$  °C, contrary the eutectic reaction suggested by Okamoto. The standard enthalpy of formation of  $\text{In}_3\text{Zr}$  determined by dissolution calorimetry at 1173 K was found to be  $-35.3 \pm 3.2$  kJ.mol<sup>-1</sup>.at<sup>-1</sup>.

In the future, determination of the standard formation enthalpies of  $\text{In}_2\text{Zr}$  compound using dissolution calorimetry will be repeated and zirconium rich phases will be investigated. The new results obtained, together with literature data, will be combined to establish a CALPHAD description of the system which will be included in the NUCLEA database.

[1] Schubert K., Frank K., Gohle R., Maldonado A., Meissner H.G., Raman A., et al., *Einige Strukturdaten Metallischer Phasen* (8): *Die Naturwissenschaften*. (1963): 50 (2): 41–41.

[2] Okamoto H., *The Indium-Zirconium System: Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. (1990): 11 (2): 150–152.

## SUJET DE LA THÈSE

Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF  
(*Accident Tolerant Fuel*)

Doctorant :	Jinjiang CUI
Date du début de la thèse :	09 / 11 / 2020
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN
Directeur de thèse :	Olivier TOUGAIT (Université Lille)
École doctorale :	Université Lille / SMRE
Financement de thèse :	IRSN

The aim is to evaluate the behavior in severe accident conditions of the so-called ATF fuels as chromium oxide doped fuels and chromium-coated zirconium alloys, currently developed by Framatome. The presented work is devoted to an experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties of the Zr-Cr-O and U-Cr-O ternary systems which will be integrated into the NUCLEA thermodynamic database modeling. Such investigation requires to investigate first the binary systems and in a second step the ternary ones. In the first year of the Ph.D., the Zr-Cr and Zr-Cr-O phase diagrams have been studied.

After a review of the available experimental data related to the Cr-Zr system, the unknown features of this system have been fixed with precision, i.e. the composition and the temperatures of the two eutectic transformations in the system, the existence of different phases (C15, C14 structures) around the  $ZrCr_2$  composition and the allotropic temperatures, and the existence composition domain of these phases at different temperatures. The Laves phase C36 that was experimentally supported in some past experimental studies is not confirmed. Drop calorimetry dissolution experiments in aluminum baths of  $ZrCr_2$  monophasic samples of C14 and C15 Laves structures were performed at 900°C. Combined with Zr and Cr dissolution in the same conditions we have determined the standard enthalpy of formation of the Laves phases of  $ZrCr_2$  for the first time. The samples were also used to measure the specific heat capacity of  $ZrCr_2$  in a wide temperature interval (1.8K to 1063K). DFT calculations allowed to determine the enthalpy of formation of C14 / C15 at 0K. Combining this result and Cp data, their calculated enthalpies of formation at 298.15K showed a good agreement with the measurement.

For the Zr-Cr-O system, only Rhee et al. present experimental isothermal sections at 1200°C, 1500°C, and 1700°C with the existence of a ternary compound  $Zr_3Cr_3O$  for which there are no thermodynamic data. Considering the lack of experimental data on this system, a phase relation investigation was started with ternary samples prepared for various compositions. Then they were examined by XRD and SEM. As a result, the phase equilibrium domains in ternary have been determined at 1200°C and 1500°C, confirming the previous works. The thermodynamic properties of  $Zr_3Cr_3O$  are key for the CALPHAD modeling. A method to produce samples with purity > 98% at. of  $Zr_3Cr_3O$  was developed and allowed to synthesize this compound. In the future, its enthalpy of formation and heat capacity will be determined.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en solutions tamponnées

Doctorante :	Coralie LE MAOUT ALVAREZ
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	William LE SAUX / Laurent CANTREL
Directeur de thèse :	Marie-Odile SIMONNOT - LRGP
École doctorale :	Lorraine / Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie
Financement de thèse :	IRSN

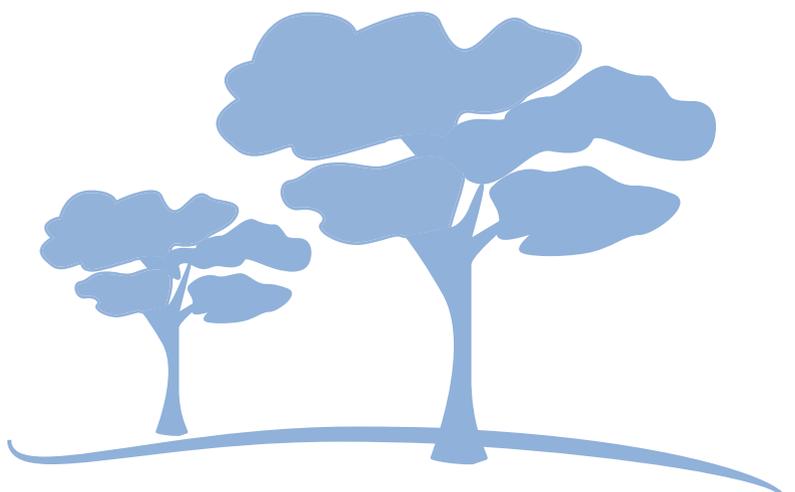
En cas de brèche sur le circuit primaire d'un réacteur nucléaire (accident de type APRP), des débris seraient générés par le jet et pourraient être transportés jusqu'aux filtres des puisards des circuits de recirculation situés au fond de l'enceinte de confinement du réacteur. Ces débris pourraient alors conduire au colmatage physique et potentiellement chimique de ces filtres et rendre indisponible la fonction de refroidissement « long terme » du réacteur par recirculation de l'eau. La contribution chimique correspond à la formation de précipités / gels au sein du lit fibreux. La formation de ces précipités résulte de la présence en solutions d'ions suite à la dissolution partielle des isolants et la corrosion de surfaces métalliques. Cette contribution chimique reste difficile à appréhender. L'objectif de cette recherche est d'étudier la nature des effets chimiques et leur ampleur, afin de déterminer les seuils critiques en concentration d'espèces, au-delà desquels la contribution chimique est avérée.

Une première partie de mes travaux consiste à l'étude de la formation de précipités susceptibles de se produire. A cette fin, des essais de dissolution des débris ont été réalisés afin de déterminer les cinétiques de relâchement des espèces considérées (silicium, calcium et zinc principalement) en solution d' $H_3BO_3$  / NaOH. Ces résultats permettent de réaliser ensuite des essais avec des solutions modèles contenant du silicium, du calcium et du zinc afin d'étudier leurs réactivités.

Les premiers résultats montrent la formation de précipités amorphes composés de : silice, borate de calcium, borosilicate et silicate de zinc. L'identification a été possible grâce aux données de la littérature et aux différentes techniques de caractérisation mises en œuvre (MEB-EDX, IRTF-ATR, DRX, ToF-SIMS). L'influence de la température a un impact sur la quantité de précipité qui est plus importante pour une température proche de 60°C. Les résultats expérimentaux ont été comparés à ceux issus d'un outil de simulation de type géochimique en testant différentes bases de données (chess.tdb ; chess.thermochimie\_v9.tdb ; tdbvit0.tdb). La comparaison entre nos données expérimentales et les résultats de nos simulations indique une bonne cohérence globale.

Ces essais vont être prochainement complétés par des essais « en recirculation » dans le dispositif à moyenne échelle COPIN (COlmatage de filtres de Puisards de l'Industrie Nucléaire) (~120 L) présenté sur la figure.





## ➤ Mercredi 30 mars

17 h 15 - 18 h 10 Salle Riviera

### SESSION PLÉNIÈRE

#### ➤ ENVIRONNEMENT - ÉVALUATION DU RISQUE SISMIQUE

**Présidente: Oona SCOTTI**

Chercheuse en sismologie (PSE-ENV / SCAN / BERSSIN)

**Marion BAQUES** - Évolution spatio-temporelle de la sismicité de la zone Ubaye / Haute-Durance : apports pour la compréhension de la dynamique et de l'évolution des essaims de sismicité en domaine de faible déformation.

**Mathilde BANJAN** - Le signal sédimentaire comme élément de caractérisation de l'activité sismique au front des Alpes depuis la dernière période glaciaire.

**Loïc GISSELBRECHT** - Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs.

## SUJET DE LA THÈSE

**Évolution spatio-temporelle de la sismicité de la zone Ubaye / Haute-Durance :  
apports pour la compréhension de la dynamique et de l'évolution des essaims de sismicité  
en domaine de faible déformation**

Doctorante :	Marion BAQUES
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2019
Laboratoire :	Géoazur - Valbonne Sophia Antipolis
Tuteur de thèse :	Hervé JOMARD
Directeur de thèse :	Louis DE BARROS
Co-Directeur :	Maxime GODANO
École doctorale :	Université Côte d'Azur / Sciences fondamentales et appliquées
Financement de thèse :	IRSN / CEA

La région de l'Ubaye, situé à 100 km de Nice et Grenoble, est l'une des zones les plus sismiquement actives de France. Depuis les années 1950, plus d'une dizaine de séismes de magnitude supérieure à 4 ont été enregistrés, certains ayant été ressentis à plus de 200 km de l'épicentre et causant des dégâts dans les villes les plus proches. Différents types de séquences sismiques sont observées dans cette région : chocs principaux suivis par des répliques (moins fortes) ; essaims de séismes caractérisés par une succession de petits séismes pouvant durer de quelques jours à quelques années ; un mélange de chocs principaux-répliques et d'essaims.

Ces différentes séquences sismiques impliquent une interaction complexe entre différents processus, et en particulier une diffusion de pression de fluides. Une meilleure compréhension de ces processus peut permettre de mieux anticiper l'évolution de la sismicité, et donc avoir un impact sur la manière de déterminer l'aléa sismique. Ma thèse s'inscrit donc à l'IRSN dans l'objectif de mieux « caractériser les sources géologiques qui contrôlent l'aléa sismique ».

Mon travail s'est concentré dans un premier temps sur l'analyse spatio-temporelle de la sismicité d'un point de vue historique (avant 1965) et instrumentale (après 1965), qui a fait l'objet d'un article de synthèse bibliographique publié dans les Comptes-rendus Géosciences (Baques et al., 2021). En parallèle, la détermination des mécanismes au foyer, de l'état de contraintes et des pressions de fluides a permis d'affiner notre compréhension du rôle des fluides pour différentes zones et périodes de la région de l'Ubaye. Les principaux résultats obtenus durant cette deuxième année sont :

- la majorité des séismes (80%) ont besoin de surpression de fluides (jusqu'à 40%) pour se produire, qu'importe la localisation ou la période de temps.
- la magnitude des séismes est indépendante de la surpression de fluides requise. Les forts séismes semblent aussi déclenchés par des surpressions de fluides.
- l'évolution des surpressions de fluides dans le temps semble être un marqueur du type de séquence sismique. Pour un type choc principal / répliques, la surpression diminue dans le temps après le choc principal tandis qu'elle varie aléatoirement dans le cas d'essaims de séismes.
- à partir des différents résultats, je propose un modèle conceptuel pour expliquer le déclenchement des chocs principaux / répliques ainsi que des essaims par les surpressions de fluides.

Un article présentant ces différents résultats et les comparant avec d'autres régions dans le monde est en cours de finalisation.

## SUJET DE LA THÈSE

## Le signal sédimentaire comme élément de caractérisation de l'activité sismique au front des Alpes depuis la dernière période glaciaire

Doctorante :	Mathilde BANJAN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire d'accueil :	IsTerre Chambéry
Tuteur de thèse :	Hervé JOMARD
Directeurs de thèse :	Christian CROUZET - IsTerre; Erwan MESSAGER - EDYTEM
École doctorale :	Université Savoie Mont Blanc / ED Terre-univers-environnement
Financement de thèse :	IRSN / CODUSMB

Ma thèse s'inclue dans le cadre des recherches menées par l'IRSN pour la caractérisation des sources géologiques contrôlant l'aléa sismique et dans la suite des travaux de recherche sur l'activité tectonique quaternaire des failles du Jura Méridional, menés par Camille De La Taille (thèse IRSN 2015).

Mon objectif est d'établir une chronique événementielle sur de longues périodes de temps (~12 000 ans) pour mieux appréhender l'occurrence d'événements sismiques majeurs à période de retour élevée au front des Alpes.

Pour cela, nous centrons les analyses (identification, quantification et datation) sur les dépôts de type sismo-turbidites enregistrés dans le lac préalpin d'Aiguebelette. Le choix du site d'étude est motivé par les faibles apports sédimentaires des affluents qui permettent de s'affranchir de l'enregistrement des dépôts de crues et ainsi d'archiver des dépôts principalement liés aux séismes. Le choix du site est aussi défini par la présence de plusieurs failles reconnues actives dans la zone proche au lac et dont l'activité pourrait avoir été archivée dans les sédiments lacustres (sismo-turbidites).

Deux séquences sédimentaires longues ont été prélevées dans le lac. Dans ces séquences, plus de 50 dépôts événementiels (> 0.5 cm d'épaisseur) ont été identifiés visuellement par contraste avec la sédimentation continue varvée. 33 d'entre eux ont été caractérisés comme sismo-turbidites par leur foliation élevée de l'anisotropie de susceptibilité magnétique, associée à l'effet de seiche dans la colonne d'eau consécutif d'un séisme.

En première analyse, la fréquence de l'ensemble des dépôts type sismo-turbidites (entre 12 000 cal BP et le XIII<sup>ème</sup> siècle) ne présente pas de tendance particulière, avec une période de retour moyennée à 500 ans pour les séismes enregistrés dans ce lac. L'analyse de carottes plus courtes est en cours, afin de couvrir la période la plus récente et de réaliser la corrélation aux événements sismiques historiques. Les premières analyses ont permis d'identifier des dépôts événementiels synchrones au séisme de Corrençon de 1962 (Iepc VII-VIII).

Enfin, un premier article soumis à *Sedimentology* se focalise sur le dépôt principal observé dans le lac d'Aiguebelette et daté à la transition entre le Tardiglaciaire et l'Holocène (i.e. environ 11 700 ans). Une synchronicité d'occurrence est constatée entre plusieurs dépôts archivés dans différents lacs régionaux, permettant de discuter de l'impact de cette transition climatique majeure sur l'activité sismique régionale.

## SUJET DE LA THÈSE

## Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs

Doctorant :	Loïc GISSELBRECHT
Date du début de la thèse :	10 / 09 / 2020
Laboratoire :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Tuteur de thèse :	Bérénice FROMENT
Directeur de thèse :	Pierre BOUE - ISTERre
École doctorale :	Université Grenoble Alpes / Terre Univers Environnement
Financement de thèse :	IRSN / Projet ANR DARE

Certaines structures géologiques, comme les anciennes vallées sédimentaires, sont propices à la génération d'« effets de site ». Lors d'un séisme, ce phénomène peut mener à une augmentation de l'amplitude du mouvement du sol (amplification) et à l'allongement de sa durée. Dans un contexte d'évaluation de l'aléa sismique, il est important de prendre en compte ces effets de site. Le SCAN / BERSSIN étudie ce phénomène depuis plusieurs années et, dans le cadre du projet ANR franco-allemand DARE (2020-2023), mène des travaux dans la zone du Tricastin visant à exploiter le « bruit sismique ambiant » sur un réseau de 400 capteurs sismiques pour analyser les effets de site associés à la vallée sédimentaire du Rhône. Le bruit sismique ambiant correspond aux faibles vibrations permanentes de la surface de la Terre. D'origine naturelle ou anthropique, il constitue une source de données sismiques permanente et exploitable même en région de faible sismicité. Il présente ainsi un intérêt évident en France métropolitaine pour étudier les phénomènes sismiques. L'objectif de cette thèse est d'étudier le potentiel du bruit ambiant dans l'estimation des effets de site.

Après avoir procédé à un contrôle qualité du jeu de données denses issu des 400 capteurs sismiques durant les premiers mois de thèse, nous avons cherché à quantifier l'amplification du mouvement au sein de la vallée à partir du bruit ambiant. Nos résultats montrent que l'amplification estimée à basse fréquence est très cohérente avec la structure géologique de la vallée sédimentaire (Fig.1), indiquant que le bruit ambiant permet de quantifier l'amplification du mouvement du sol liée à la géologie, dans ces gammes de fréquence. L'estimation de l'amplification à haute fréquence est plus critique en raison de l'influence de certaines sources de vibrations d'origine anthropique très localisées (autoroutes, trains, sites industriels et nucléaires, etc). Pour limiter l'influence de ces sources, nous avons utilisé un algorithme de *clustering* afin de sélectionner pour chaque capteur, les données les moins impactées. Nous avons ainsi pu améliorer l'estimation à certains capteurs mais pas dans les zones impactées par des sources anthropiques sans interruption. En deuxième partie de thèse, nous utiliserons la méthode dite des « corrélations de bruit » qui nous permettra d'extraire plus d'informations de ces données et devrait aider à améliorer les résultats à haute fréquence.

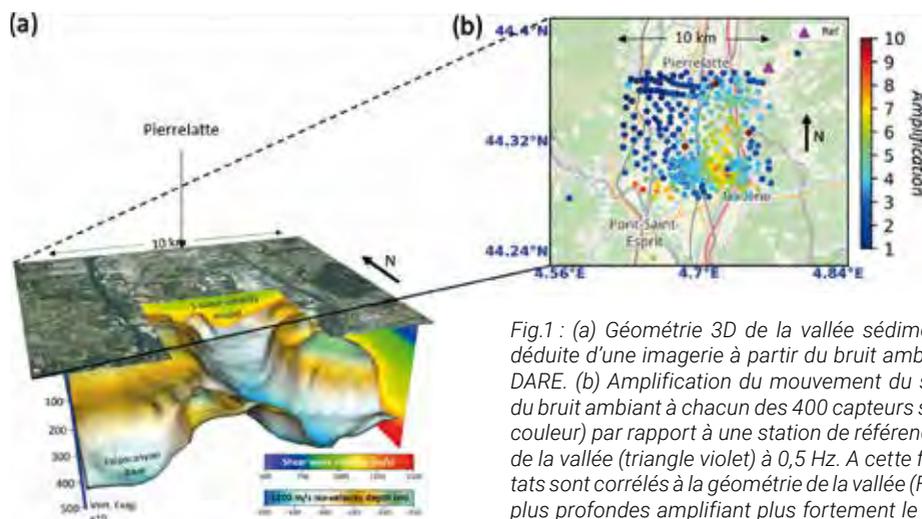


Fig.1 : (a) Géométrie 3D de la vallée sédimentaire du Tricastin déduite d'une imagerie à partir du bruit ambiant issue du projet DARE. (b) Amplification du mouvement du sol estimée à partir du bruit ambiant à chacun des 400 capteurs sismiques (ronds de couleur) par rapport à une station de référence située en-dehors de la vallée (triangle violet) à 0,5 Hz. A cette fréquence, les résultats sont corrélés à la géométrie de la vallée (Fig.1 a), les zones les plus profondes amplifiant plus fortement le mouvement du sol.

# SESSION POSTERS

Salle Klee

Mardi 29 mars 11 h 00 - 12 h 00  
Mercredi 30 mars 11 h 15 - 12 h 15

## Doctorants de 1<sup>re</sup> année PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

### ► UNITÉ DE RECHERCHE - SANTÉ

**Lucie ANCEL** - Nouveaux outils de diagnostic et pronostic moléculaire des brûlures radiologiques par approche « multi-omique ».

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

**Rémi HANNOTEL** - Analyse économique des conséquences de l'accident nucléaire.

**Ronan LELIEVRE** - Mesure de l'émission des neutrons produits par lasers extrêmes et application à la nucléosynthèse.

**Mahinour MOBASHER** - Use of glass from smartphone touch screen for radiological accident dosimetry by EPR spectroscopy.

**Enya MOBIO** - Conception de champs neutroniques réalistes et épithermiques 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.

**Florian SALIOU** - Effet des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de pathologies cardiaques et troubles du rythme chez la souris C57Bl/6 male.

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

## SUJET DE LA THÈSE

## Nouveaux outils de diagnostic et pronostic moléculaire des brûlures radiologiques par approche « multi-omique »

Doctorante :	Lucie ANCEL
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRAcc
Tuteur de thèse :	Stéphane Flamant
Directeur de thèse :	Maâmar SOUIDI - IRSN
École doctorale :	Université Paris-Saclay / ITFA
Financement de thèse :	TAF

Un accident radiologique d'origine industrielle, médicale ou consécutif à un acte de malveillance, peut conduire à une exposition localisée à des doses élevées de rayonnements ionisants. Cette exposition entraîne le développement d'une lésion musculo-cutanée radio-induite, ou brûlure radiologique, dont la cinétique dépend de la dose absorbée, de la durée d'exposition et du volume corporel irradié. La lésion, de nature évolutive, prend la forme d'une rougeur (érythème) dans les temps précoces après exposition, avant de s'atténuer et disparaître pendant une phase de latence asymptomatique. Celle-ci peut durer quelques jours ou semaines en fonction de la gravité de l'exposition, et est suivie de la phase pathologique caractérisée par l'apparition d'une brûlure manifeste et douloureuse. Cette lésion peut se résorber avec le temps à la suite des stratégies thérapeutiques mises en place, mais également réapparaître longtemps après l'exposition de manière imprévisible, ce qui peut conduire à une nécrose tissulaire tardive. Un diagnostic et un pronostic précoces du degré d'atteinte des victimes d'une irradiation localisée permettrait une prise en charge thérapeutique plus rapide, et limiterait les risques d'effets délétères associés à l'expansion de la lésion radio-induite (stratégie scientifique de l'IRSN : questions 3 et 5).

Dans le but d'établir des outils de diagnostic et de pronostic de la lésion qui correspondent aux conditions d'utilisations en clinique, c'est-à-dire dans un contexte d'accident radiologique impliquant la nécessité d'examiner rapidement un nombre de victimes allant de quelques individus isolés à quelques centaines ou davantage, une recherche de signature moléculaire de la lésion radio-induite est réalisée dans les bio-fluides corporels (sang et urine) par une approche omique. Nous utilisons pour cela un modèle préclinique murin de brûlure radiologique après irradiation localisée de la patte postérieure gauche à différentes doses de rayons X. Des signatures moléculaires en microARNs et en métabolites sont recherchées à différents temps post-exposition afin de caractériser une signature diagnostique de la lésion (J14 post-irradiation) ainsi qu'une signature prédictive (J1 et J7 post-irradiation, phase asymptomatique). Les variations d'expression des microARNs et du taux des métabolites feront l'objet d'analyses de corrélations avec différents paramètres cliniques : le score lésionnel observationnel, la numération formule sanguine, la perfusion sanguine cutanée (laser Doppler), les marqueurs de l'inflammation (dosage de la CRP), la perte hydrique cutanée (Tewamètre) et l'atrophie musculaire (imagerie microCT). Une recherche des mécanismes moléculaires impliqués sera également réalisée sur les échantillons de peau et muscle des pattes irradiées et non irradiées, notamment par RT-qPCR et hybridation *in situ*.

## 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 :	02 / 11 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Sophie ANCELET
Directeur de thèse :	Chantal GUIHENNEUC – Université de Paris
École doctorale :	Université Paris Saclay / EDSP
Financement de thèse :	ORANOVIRSN

En épidémiologie, les risques de cancers potentiellement induits par des expositions multiples aux rayonnements ionisants (RIs) sont peu étudiés et donc *a fortiori* peu connus. L'élaboration de normes de radioprotection reste principalement basée sur un cadre d'exposition mono-factorielle. L'objectif de la thèse est d'améliorer, à l'aide de modèles probabilistes bayésiens et d'algorithmes de machine *learning*, la caractérisation des risques de cancers associés à des co-expositions radiologiques. Les populations étudiées seront des cohortes de travailleurs du cycle du combustible nucléaire qui, dans leur activité professionnelle, sont chroniquement exposés à de multiples sources de RIs potentiellement cancérigènes. La thèse s'inscrit ainsi dans la stratégie scientifique de l'IRSN en répondant aux questions : « 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, de la population et des patients ? »

Les premiers travaux de thèse portent sur la cohorte française des mineurs d'uranium, exposés à trois sources de RIs : le radon, les poussières d'uranium et les rayonnements gamma. Dans sa thèse, Marion Belloni a proposé d'utiliser un modèle de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition (BPRM) pour estimer le risque de décès par cancer du poumon potentiellement associé à ces trois expositions radiologiques simultanées. Ses travaux ont démontré l'intérêt de cette classe de modèles mais les erreurs de mesure sur les expositions n'ont pas été prises en compte, ce qui pourrait induire un biais dans les estimations de risque. Une extension aux modèles BPRM doit donc être proposée pour prendre en compte ces erreurs de mesure. Une première étape consiste à proposer un modèle hiérarchique bayésien permettant de corriger l'estimation du risque de décès par cancer du poumon associé à chaque exposition radiologique. La relation exposition-risque a été modélisée avec un sous-modèle de survie paramétrique (modèle de Cox ou en excès de risque instantané). Deux fonctions ont été comparées pour décrire le risque de base. Plusieurs sous-modèles décrivant les erreurs de mesure sur l'exposition au radon ont été proposés. Un algorithme Monte-Carlo par Chaînes de Markov a été implémenté pour réaliser l'apprentissage bayésien des modèles proposés. Sur les données de la cohorte, une augmentation du risque de mortalité par cancer du poumon associé à l'exposition au radon est observée après prise en compte des erreurs de mesure. Des analyses par simulation sont en cours afin de valider l'approche.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Théo FRECHARD
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Chrystelle IBANEZ
Directeur de thèse :	Dmitry KLOKOV - IRSN
École doctorale :	Université Paris Saclay / ITFA
Financement de thèse :	IRSN

Cette thèse s'inscrit dans la continuité du projet SPRINT qui a développé un protocole d'inhalation de particules de tungstène chez le rat, et a mis en lumière des effets cérébraux tels que l'apoptose de cellules microgliales dans le bulbe olfactif et des phénotypes de souffrance neuronale et de stress dans le cortex frontal.

Nous poursuivons nos études sur les facteurs d'expositions professionnelles en lien avec les activités nucléaires. La principale cause de contamination inhérente à ces activités est l'inhalation de polluants particuliers dont le cerveau est une cible directe. Mais dans ce contexte, le personnel est également exposé à des polluants de nature radiologique.

Ainsi, notre projet s'inscrit dans une démarche en lien avec le concept d'exposome qui rassemble l'ensemble des substances et stress auquel un individu sera exposé de sa conception *in utero* jusqu'à sa fin de vie. Notre projet se positionne comme un point de départ méthodologique et scientifique sur un mélange de stressseurs pertinents au regard de l'expertise de l'IRSN.

Notre objectif est l'étude des effets d'une coexposition chimique et radiologique chez le rat par une approche preuve de concept qui permettra de tester l'hypothèse selon laquelle l'inhalation de particules de tungstène associée ou non à une irradiation gamma pourrait exercer des effets différentiels sur les paramètres de toxicité cérébrale et d'identifier les principaux processus biologiques impliqués.

Durant notre première campagne d'exposition en 2022, les rats seront exposés à une inhalation aigue d'un aérosol de tungstène à concentration dite « forte » ( $80 \text{ mg.m}^{-3}$ ) et/ou à une irradiation externe gamma aigue à 50 mGy (dose dite « faible »).

Les conséquences de cette coexposition seront d'abord étudiées à 24 heures et 28 jours post-exposition afin d'observer les effets précoces et leur pérennité. La survie et l'intégrité morphologique des cellules neurales, la neuroinflammation et le stress oxydant seront évalués notamment dans le bulbe olfactif et le cortex frontal à l'échelle moléculaire et cellulaire.

En amont de cette campagne, pour renforcer l'évaluation des neurones en souffrance dans le cortex cérébral, des colorations au Crésyl Violet et quantification ont été mises au point sur des coupes de cerveaux de campagnes précédentes. Nous avons observé plusieurs phénotypes de souffrance neuronale : des neurones chromatolytiques, et d'autres présentant une coloration tronquée cohérente avec la perte partielle du marquage NeuN déjà observée et quantifiée dans SPRINT. Cette technique sera valorisée lors de la prochaine campagne.

## SUJET DE LA THÈSE

## Analyse économique des conséquences de l'accident nucléaire

Doctorant :	Rémi HANNOTEL
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE / SESUC / LERN
Tuteur de thèse :	Sophie CÊTRE
Directeur de thèse :	Xavier Ragot – Sciences Po
École doctorale :	Sciences Po – Département d'Economie
Financement de thèse :	IRSN

Cette thèse s'intéresse à la nécessaire prise en compte de la dimension économique et sociétale en cas d'accident nucléaire pour anticiper les réactions des agents économiques face à la catastrophe. L'économie comportementale permet précisément d'appréhender et de quantifier ce « facteur humain », comment il peut interagir avec la gestion de la crise, et de déterminer in fine les capacités de résilience de la société. Par ailleurs, l'intégration des dynamiques macroéconomiques de l'accident nucléaire permet d'anticiper plus finement les conséquences économiques de l'accident, au-delà des zones contaminées.

La stratégie scientifique de l'IRSN rappelle « l'impératif collectif d'éviter un accident majeur et à tout le moins de limiter les conséquences qui pourraient en résulter (...) » et s'interroge sur « les dynamiques d'action individuelle et collective en situation de crise, et [les] facteurs organisationnels et humains [qui] contribuent à leur performance ». L'évaluation de l'impact des choix de la doctrine post-accidentelle sur les coûts d'image fait partie intégrante de ce questionnement. Ces travaux contribueront à évaluer les conséquences des choix de la doctrine et donc de contribuer à son développement et à son amélioration (PMT - Plan à moyen terme de l'IRSN, p.90).

L'objectif de la thèse est donc de comprendre les mécanismes économiques liés au secteur du nucléaire, et plus largement au secteur de l'énergie. Grâce aux méthodes récentes de la science économique, la thèse a pour but de mieux appréhender les enjeux liés à l'accident nucléaire, dans une perspective post-accidentelle, mais aussi avant qu'il se produise.

La thèse se focalise sur trois axes :

- la notion même de risque d'accident. Je cherche à comprendre comment se structure notre propension à se prémunir d'un risque futur avec une certaine probabilité d'occurrence, et donc comment ce risque possible dans le futur impacte nos décisions du présent.
- la propagation du choc économique lié à un accident nucléaire sur l'ensemble de l'économie française. Dans quelle mesure un accident nucléaire impacterait (ou pas) l'économie régionale et/ou nationale, et sous quelles conditions ?
- sur l'aspect comportemental des conséquences économiques de l'accident, c'est-à-dire les effets de réputation qu'un pays peut avoir suite à un accident nucléaire et les possibles répercussions économiques que cela engendre dans le secteur industriel ou encore celui du tourisme (« les coûts d'image »).

## SUJET DE LA THÈSE

**Mesure de l'émission des neutrons produits par lasers extrêmes  
et application à la nucléosynthèse**

---

Doctorant :	Ronan LELIEVRE
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2021
Laboratoire :	École Polytechnique Paris / LULI & PSE-SANTE / SDOS / LMDN
Tuteur de thèse :	Amokrane ALLAOUA
Directeur de thèse :	Julien FUCHS - CNRS
École doctorale :	Institut Polytechnique de Paris
Financement de thèse :	CNRS / IRSN

---

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 laser APOLLON, situé sur le plateau de Saclay, serait ainsi capable d'atteindre de très hautes intensités ( $10^{8-9}$  neutrons par impulsion laser de 15 fs) et des énergies de plusieurs dizaines de MeV, permettant alors de reproduire en laboratoire le processus rapide de nucléosynthèse responsable de la création des éléments au-delà du bismuth.

Pour prouver expérimentalement cette théorie, il est préalablement nécessaire de caractériser le flux de neutrons produit par les réactions de spallation des ions générés par l'interaction laser-cible. L'objectif est donc d'étudier et de mesurer les émissions de neutrons issues du laser APOLLON, dans sa configuration à 10 PW.

Deux missions principales sont alors identifiées avec, en premier lieu, un travail de simulation des émissions de neutrons par ces réactions de spallation via l'utilisation de codes dédiés à la physique nucléaire (GEANT4 et MCNP). Puis, avec la poursuite du développement d'un spectromètre par activation (SPAC) adapté aux fluences neutroniques produits par APOLLON, la méthode de l'activation étant la plus adaptée pour mesurer des champs neutroniques intenses avec une forte composante gamma.

La réponse en énergie du SPAC devra alors être évaluée sur des champs neutroniques de références (installations AMANDE et CEZANE) et une caractérisation de la chaîne de spectrométrie gamma, nécessaire à la mesure de l'activation, devra être effectuée avant de pouvoir utiliser le SPAC pour caractériser le champ neutronique produit par le laser APOLLON.

## SUJET DE LA THÈSE

Use of glass from smartphone touch screen for radiological accident dosimetry  
by EPR spectroscopy

Doctorant :	Mahinour MOBASHER
Date du début de la thèse :	10 / 11 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SDOS / LDRI
Tuteur de thèse :	Francois TROMPIER
Directeur de thèse :	Nadège OLLIER-LSI L'école polytechnique
École doctorale :	Institut Polytechnique de Paris
Financement de thèse :	IRSN / Financement BPI en cours

In the context of malevolent or accidental use of radioactive materials, there is an identified need for a fast and reliable method with large capacity to sort out the individuals actually exposed to ionizing radiation.

In addition to biological dosimetry and tooth enamel mini-biopsy analysis by Electron paramagnetic resonance spectroscopy (EPR) offering already relatively large capacity in triage mode, a new approach initially proposed by IRSN is based on the non-destructive analysis of smartphone touchscreen by EP<sup>[1]</sup>. Smartphone can therefore become a radiation dosimeter able to assess the dose of exposure of an individual<sup>[2]</sup>. Indeed, the huge advantage of tempered glass of touchscreen is that everyone currently has a smartphone and therefore a fortuitous dosimeter in the pocket.

However, the current state of the art of EPR dosimetry on glass requires collecting from the phone a few tens of mg of the touch screen limiting the measurement capacity and complicating the overall organization. The PhD work here presented is part of a 3 years project (TRILE)<sup>[3]</sup>. TRILE aims to develop a fully automated EPR device able to quickly measure a whole phone without prior sampling and with field deployable capability to sort out the exposed population.

To contribute to this aim, the objectives of the thesis are to identify the different defects and the associated mechanism of formation (before and after irradiation) measured in the different generations of touch screen. The behaviour of the different defects will be characterized against irradiation, temperature and UV exposure. The variability of properties will be also studied with care, as it conditions the uncertainty budget on the estimated dose. The finality is to be able to automatically determine the type of glass and the EPR signals of interest for the dose estimation among all signals of different origins (Intrinsic, UV or radio induced..) that overlaps in the EPR spectra to provide the best dose estimation. Ideally, EPR signals specifically induced by irradiation and sufficiently stable are considered. As a result, a library of defects /signals will be supplied as input for the work package of TRILE project on automated quantification. In addition to EPR techniques available at IRSN, advanced methods of EPR and Luminescence will be used. A partnership with Corning® which produces tempered glass is in the process to be concluded to provide glass samples of different generations and production batches to be studied in this work.

## References

- [1] Trompier, F., Della Monaca, S., Fattibene, P., Clairand, I., Radiation Measurements, 46 (9), EPR dosimetry of glass substrate of mobile phone LCDs, 2011, pp. 827-831.
- [2] International Commission on Radiation Unit (ICRU), report 94, 2020.
- [3] Tri Radiologique In situ à Large Echelle (TRILE) soumis et accepté dans l'AMI maladies infectieuses et NRBC du PIA4.

## SUJET DE LA THÈSE

**Conception de champs neutroniques réalistes et épithermiques 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 :	PSE-SANTE / SDOS / LMDN
Tuteur de thèse :	Véronique LACOSTE
Directeur de thèse :	Daniel SANTOS - LPSC
École doctorale :	Université de Grenoble Alpes / Physique
Financement de thèse :	LNE / IRSN

---

Le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) a en charge la coordination de la métrologie française qu'il représente au niveau international dans divers domaines. Afin de répondre à cette mission, le LNE compte différents laboratoires associés. Parmi eux, le Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (LMDN), basé à Cadarache, 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. Cette plateforme, située au sein des installations CEZANE et AMANDE-MIRCOM, est constituée de :

- l'irradiateur Van Gogh, produisant des champs neutroniques à partir des sources de  $^{241}\text{Am-Be}$  et de  $^{252}\text{Cf}$ ;
- l'accélérateur SAMES T400, qui, couplé aux dispositifs CANEL (CANon à NEutrons Lents), et BLOG, permet de générer un champ neutronique dit, « réaliste », représentatif de ceux associés aux postes de travail dans l'industrie du nucléaire et un champ à forte composante thermique ( $E_n < 0,025$  eV);
- l'accélérateur AMANDE, produisant des champs monoénergétiques d'énergies comprises entre 2 keV et 20 MeV.

Afin de compléter les champs neutroniques de référence disponibles au sein de sa plateforme expérimentale et de répondre aux besoins émergents avec notamment le développement de la AB-BNCT (*Accelerator Based Boron Neutron Capture Therapy*), le LMDN souhaite développer un champ dans le domaine des neutrons épithermiques (énergies comprises entre 0,5 eV et 10 keV).

Cette thèse, réalisée en collaboration avec le Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologique (LPSC), porte sur la conception puis la réalisation de ce nouveau champ unique en France ainsi que sur le développement d'une méthode de spectrométrie neutronique dédiée à la caractérisation des neutrons sur cette gamme d'énergie. La mise en place de ce nouveau dispositif est envisagée sur l'accélérateur SAMES T400 ou AMANDE.

Les étapes de cette thèse consistent à :

- définir par simulations Monte-Carlo un modérateur permettant l'obtention de neutrons épithermiques,
- étudier une méthode de caractérisation de ce nouveau champ. L'utilisation de détecteurs existants, ainsi que de systèmes innovants seront envisagés afin de répondre aux exigences imposées.

Depuis le début de cette thèse, des études comparatives ont été menées afin d'identifier les installations produisant des champs épithermiques à travers le monde et de vérifier l'applicabilité de ces systèmes aux accélérateurs AMANDE ou T400. Une étude bibliographique sur les systèmes de détection de neutrons épithermiques a également été réalisée.

## SUJET DE LA THÈSE

**Effet des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma  
sur le développement de pathologies cardiaques et troubles du rythme  
chez la souris C57Bl/6 mâle**

Doctorant :	Florian SALIOU
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Virginie MONCEAU
Directeur de thèse :	Éric MOREL – UMR1180
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Département Pharmaco-toxicologie
Financement de thèse :	IRSN

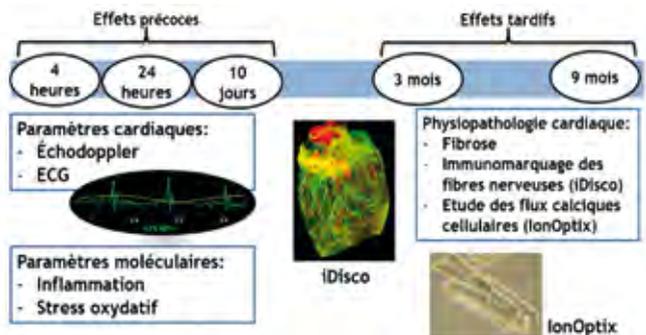
Les études épidémiologiques post-accident nucléaire (Tchernobyl et Fukushima) démontrent qu'après une exposition aux rayonnements ionisants gamma, il y a une relation dose-risques pour les fortes doses (> à 500 mGy). A contrario pour les doses faibles à modérées (< 500 mGy), la relation dose-risques peut varier et reste inexplorée. Néanmoins, quelques études épidémiologiques ont répertorié des maladies cardiovasculaires après cette exposition. Cependant, l'effet des faibles doses de rayonnements sur le trouble du rythme cardiaque reste controversé. L'activité cardiaque est finement contrôlée par la balance entre l'activité du système nerveux orthosympathique (« accélérateur ») et du parasymphatique (« modérateur »). Peu d'étude se sont intéressés à la relation « système nerveux-cœur ». Pourtant, une modification de cet équilibre serait à l'origine de dysfonction cardiaque, de l'inflammation et du remodelage cardiovasculaire.

**Les objectifs de la thèse seront :**

- Déterminer un potentiel effet seuil d'apparition des atteintes cardiaques.
- Étudier l'implication du microenvironnement et la relation système nerveux-cœur.
- Caractériser les paramètres structuraux, cellulaires et moléculaires.
- Identifier les mécanismes précoces et tardifs post-exposition aux rayonnements gamma.
- Répondre à la première question scientifique de l'IRSN « Effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur le système cardiovasculaire ».

Cette étude *in vivo* consiste à exposer en corps entier des souris mâles (C57Bl/6) à différentes doses uniques de rayonnements ionisants gamma (50, 100, 250, 500, 1 000 et 2 000 mGy). Afin d'investiguer les effets à des temps précoces et tardifs. Plusieurs paramètres seront étudiés : la fonction cardiaque par échodoppler, la contractilité cellulaire et le flux calcique du cardiomyocyte par IonOptix et l'interaction du système nerveux-cœur par Western-Blot, immunohistologie et iDisco.

De plus, cette thèse fera l'objet de plusieurs collaborations, avec le CEA pour la réalisation des irradiations du modèle biologique et pour l'imagerie par un ultra microscope à feuillet de lumière ainsi qu'avec l'UMR1180 (Chatenay-Malabry) pour l'étude des cellules cardiaques. L'ensemble de ces résultats portant sur la mécanistique de l'induction de pathologies cardiaques post-exposition ; permettront de compléter les données épidémiologiques et lever les controverses sur les effets des faibles doses (< 500 mGy) de rayonnements ionisants dans le temps post-exposition.



## SUJET DE LA THÈSE

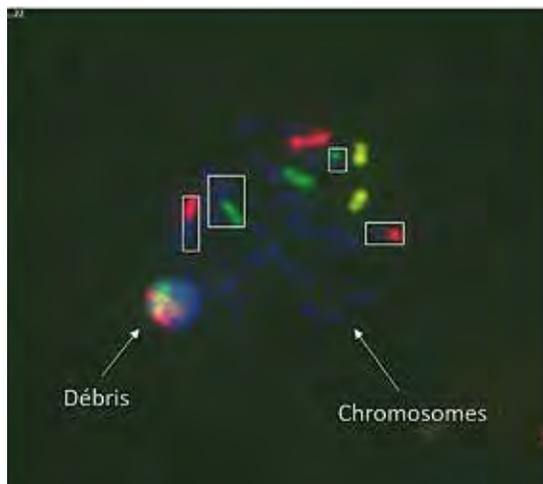
**Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques.  
Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH**

Doctorant :	Quentin TALLON
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRAcc
Tuteur de thèse :	Mohamed Amine BENADJAOUD
Directeur de thèse :	Charles KERVRANN - INRIA
École doctorale :	Université Rennes 1 / MATHSTIC
Financement de thèse :	Co-Financement AID

Suite à une exposition accidentelle à des rayonnements ionisants, il est nécessaire d'affiner l'évaluation de la dose reçue pour effectuer un diagnostic précis des victimes asymptomatiques. Parmi les techniques dosimétriques disponibles, la dosimétrie biologique réalisée sur des prélèvements sanguins consiste à dénombrer les aberrations chromosomiques au sein des lymphocytes circulants. Elle est particulièrement pertinente aussi bien pour la phase de pronostic à court moyen terme des victimes asymptomatiques, que pour leur suivi à long terme. Ce projet de thèse s'intéresse particulièrement aux aberrations chromosomiques dites stables, car elles persistent dans les cellules au cours des divisions cellulaires et peuvent servir de base à une reconstitution dosimétrique plusieurs années après l'exposition. La technique d'imagerie cytogénétique de référence est l'hybridation in situ par fluorescence (FISH), qui permet d'observer les aberrations de type inversion, délétion et translocation dans la métaphase.

Le but de ce projet est de détecter automatiquement ces aberrations grâce à des outils de Deep Learning. Les difficultés majeures proviennent du manque d'annotation des données, ce qui limite les performances des méthodes d'apprentissage automatique supervisé. Le défi consiste alors à développer une méthode qui peut à la fois tirer parti du manque d'annotations disponibles et de la grande quantité de données non annotées. Nous avons commencé par créer un pipeline non supervisé pour un mécanisme d'attention de couleurs des chromosomes fluorescents. Cela implique des algorithmes de clustering pour la quantification des couleurs sur les canaux pertinents (rouge et vert) de l'image, suivis d'une détection des valeurs aberrantes afin de parfaire la séparation des couleurs. La sortie finale de ce pipeline est un « masque de couleur » obtenu pour chaque image, l'élément principal de notre mécanisme d'attention. Les débris cellulaires et autres éléments non chromosomiques sont filtrés grâce à des architectures U-Net entraînées sur la segmentation du canal « DAPI » (bleu) des images de chromosomes. L'attention de couleur est ensuite appliquée à une architecture custom

Mask-RCNN pour la classification, la régression de la boîte englobante et la segmentation des chromosomes. Notre architecture, avec et sans attention de couleur, a montré des résultats très prometteurs sur de petits ensembles de données.



*Image FISH représentant des chromosomes en métaphase. Les rectangles indiquent l'emplacement des chromosomes aberrants.*

# SESSION POSTERS

## Doctorants de 1<sup>re</sup> année PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

### ► UNITÉ DE RECHERCHE - ENVIRONNEMENT

**Mohamed Haythem BAHLOULI** - Analyse des incertitudes issues de la modélisation couplée HM Gaz à grande échelle dans une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs.

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

**Nicolas CATHELIN** - Caractérisation de l'activité quaternaire des failles de la terminaison Nord-Est du faisceau de failles Cévenol et de l'origine de ce mouvement.

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

**Léonore FLIPO** - Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide / liquide du <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>54</sup>Mn et <sup>110m</sup>Ag dans des fleuves.

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

**Pierre TECHER** - Réponse évolutive des *Daphnia pulex* de la zone d'exclusion de Tchernobyl.

**Adrien THOMAS** - Trajectoire et résilience des radionucléides dans les grands bassins versants nucléarisés.

## SUJET DE LA THÈSE

**Analyse des incertitudes issues de la modélisation couplée HM Gaz à grande échelle dans une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs**

Doctorant :	Mohamed Haythem BAHLOULI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / UEMIS
Tuteur de thèse :	Zakaria SAADI
Directeur de thèse :	Rachid ABABOU - IMFT
École doctorale :	INPT / IMFT
Financement de thèse :	IRSN

Ce travail de thèse s'inscrit dans les recherches que conduit l'IRSN en support à l'expertise du stockage géologique profond de déchets radioactifs à haute activité (HA) et à moyenne activité à vie longue (MAVL). Dans l'argile du Callovo-Oxfordien (COx, roche hôte envisagée pour accueillir le stockage CIGEO) ainsi que dans les barrières ouvragées d'une installation de stockage (bentonite, béton...), des phénomènes de transport de gaz (essentiellement de l'hydrogène généré par corrosion des aciers, cf. Figure ci-contre pour un alvéole HA) en milieu poreux partiellement saturé sont susceptibles de se produire et d'engendrer des modifications dans la matrice solide (i.e., endommagement mécanique).



La non prise en compte dans les codes de calcul actuels d'une modélisation de transport de gaz à l'échelle de l'installation, combinant à la fois les effets d'une pression d'entrée de gaz non nulle, de l'hystérésis et des déformations géomécaniques, suscite plusieurs interrogations sur la représentativité de ces calculs.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer les incertitudes dans les modèles de migration de gaz au sein de l'installation durant sa phase de post-fermeture sur des périodes de centaines de milliers d'années, en introduisant simultanément les trois phénomènes précités.

Le travail de thèse s'articulera sur deux volets principaux. Le premier volet consiste à introduire les déformations hydromécaniques (HM) dans la modélisation des interfaces entre les scellements (barrières ouvragées) et la roche hôte en milieu poreux diphasique eau-gaz afin d'évaluer leur influence sur la pression de gaz et sur l'écoulement de l'eau. Le second volet consiste à évaluer les incertitudes de la réponse des modèles de migration du gaz et de leur sensibilité par rapport à un ou plusieurs paramètres mal connus en utilisant des méthodes probabilistes (Ababou, 2008).

Durant cette première année de thèse, un modèle de déformations hydromécaniques basé sur une loi linéaire élastique est proposé et sera couplé avec un modèle diphasique liquide-gaz incluant la pression d'entrée et l'hystérésis établi précédemment (Amri, 2021). Ce modèle élastique se base sur la loi de Hooke (e.g., Rutqvist, 2011). Dans un premier temps, un couplage HM de type Biot sera repris dans le cas d'un milieu poreux totalement saturé en eau. Ensuite, un nouveau modèle basé sur les travaux de Coussy (1991) sera proposé pour le couplage HM en écoulements diphasiques liquide-gaz. Le modèle développé sera testé et validé puis implémenté dans la plateforme TOUGH2-MP (Zhang et al., 2008) pour une application à l'échelle d'un alvéole.

## Références

- Ababou R. (2008). Risk Analysis of Systems: *Probabilistic Reliability Analysis*. Course Notes, Master of Risk Engineering, INPT INSAT ICSI, Toulouse, France, Version 1: 2008, 140 pp.
- Amri A., Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs (2021).
- Coussy O. (1991). Mécanique des milieux poreux. Edition Technip, Paris.
- Rutqvist J., 2011. Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. *Computers & Geosciences*, 2011, vol. 37, no 6, p. 739-750.
- Zhang K., Y.-S. Wu, and K. Pruess, "User's Guide for TOUGH2-MP—A Massively Parallel Version of the TOUGH2 Code", LBNL-315E, LBNL (2008).

## 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 :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Tuteurs de thèse :	Pierre ROUPSARD (IRSN/LRC) et Eric DUPONT (CEREA / EDF-R&D)
Directeur de thèse :	Yelva ROUSTAN (CEREA / ENPC)
École doctorale :	Université Paris Est SUP / SIE
Financement de thèse :	GGP Environnement (50% IRSN/50% 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 faibles, les calculs d'impact présentent de fortes incertitudes. Les mécanismes de dispersion et les propriétés de la turbulence dans ces situations sont modifiés et favorisent la stagnation des radionucléides émis dans l'atmosphère. L'amélioration de la compréhension et de la modélisation de ces situations se heurte à un manque de données au niveau international, particulièrement pour le milieu bâti.

La présente étude propose un volet expérimental et un volet modélisation. Les objectifs sont d'acquérir des données expérimentales de dispersion d'un gaz traceur en milieu bâti et en conditions de vent faible, d'analyser ces données pour comprendre les mécanismes qui pilotent la dispersion dans ces conditions, notamment le « méandrement », et de définir et valider une méthode de modélisation. Le site d'étude choisi est le SIRTA (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique), installé sur le campus de l'école Polytechnique à Palaiseau en milieu péri-urbain.

Les essais consistent à utiliser un gaz traceur pour étudier sa dispersion dans la zone d'étude, mesurée au moyen de prélèvements d'air intégrés sur plusieurs minutes et en temps réel par des spectromètres de masse afin d'établir des CTA (Coefficients de Transfert Atmosphériques). Les conditions de vent et de turbulence associées sont mesurées avec trois anémomètres ultrasoniques positionnés sur un mât de 30 m, et d'autre part avec plusieurs anémomètres ultrasoniques positionnés dans la zone d'étude (à l'intérieur du milieu bâti) sur des mâts de 3 m de hauteur. Une première campagne d'essai a été réalisée en 2020. Une seconde sera réalisée en 2022 dans le cadre de la thèse.

Le traitement et l'analyse des données comprendront l'analyse spectrale de la turbulence, l'analyse de la répartition spatiale des concentrations et la recherche de corrélations entre les variations de concentrations en gaz et de direction du vent.

La partie modélisation consistera à adapter la théorie de la similitude pour modéliser la couche de surface, à comparer des approches RANS, URANS et LES, et à comparer la modélisation de la dispersion par approches eulériennes et lagrangiennes. Le code CFD utilisé sera le Code\_Saturne, code *open source* développé par EDF-R&D. La comparaison aux données permettra de valider les choix et de définir une méthodologie de modélisation appropriée. Enfin, une comparaison mesure/modèle sera réalisée pour évaluer le modèle opérationnel gaussien pX pour ces conditions.

## SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation de l'activité quaternaire des failles de la terminaison Nord-Est  
du faisceau de failles Cévenol et de l'origine de ce mouvement

Doctorant :	Nicolas CATHELIN
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN & Géosciences Montpellier
Tuteur de thèse :	Stéphane BAIZE
Directeur de thèse :	Jean-François RITZ - Géosciences Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier / GAIA
Financement de thèse :	IRSN

Le 11 novembre 2019, la rupture de la faille de La Rouvière entraîne le séisme du Teil de Mw 4.9 et provoque une mobilisation particulière de la communauté scientifique. Cette faille appartient à la terminaison Nord-Est du faisceau de failles Cévenol (CFS), une grande structure métropolitaine active pendant les ères secondaire et tertiaire. Comme la grande majorité de ses homologues, elle n'était pas considérée comme potentiellement active, car son activité quaternaire n'avait jamais été investiguée.

Ce séisme (en mécanisme inverse), aux caractéristiques jamais vues en France, remet en question notre connaissance des failles actives en France métropolitaine, et plus particulièrement celle des failles du CFS qui s'étire près des centrales nucléaires de la vallée du Rhône. Les questions qui émergent de cet événement se regroupent en 2 thématiques : 1) l'activité quaternaire de la faille des Cévennes et la distribution de l'activité entre les différents segments qui la composent, et 2) l'origine de cette déformation tectonique.

Pour répondre à ces questions, un large chantier géophysique, géologique et paléosismologique a été ouvert, dans lequel s'intègre le sujet de recherche ici présenté. Mon travail, orienté sur les approches géomorphologiques et paléosismologiques, permettra de mieux contraindre l'activité des failles concernées à une échelle de temps bien plus importante que celle de la sismicité instrumentale ou historique. Mes recherches visent à caractériser l'activité quaternaire de la faille de la Rouvière et de l'ensemble des autres failles de la terminaison Nord-Est du CFS. Cela permettra d'améliorer notre connaissance de la dynamique de ces failles et d'apporter de précieuses données et interprétations pour mieux contraindre l'aléa sismique de la région.

Ce premier bilan du travail de thèse présente l'ensemble des investigations paléosismologiques et géomorphologiques entreprises depuis le début de la thèse. Le travail en paléosismologie se concentre sur l'ouverture de nouvelles tranchées dans le but de repérer d'anciens indices de rupture qui peuvent être datés à l'aide de différentes méthodes. Quatre tranchées ont été ouvertes en janvier 2022 sur la faille de la Rouvière. L'approche géomorphologique, plus aboutie dans ce projet car dans la continuité de mon stage de M2 (IRSN/Géosciences Montpellier), vise à identifier des structures morphologiques et à quantifier leur évolution au cours du temps. Pour cela, nous avons datés des terrasses alluviales de la vallée de l'Escoutay, perpendiculaire au CFS, afin d'en déduire une vitesse de soulèvement locale et peut-être un différentiel de part et d'autre du réseau de failles, témoignant d'une activité passée.

## 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 :	PSE-ENV / SRTE / LR2T & CNRS / IN2P3 / Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN (IPHC)
Tuteur de thèse :	Laureline FEVRIER
Directeur de thèse :	Mireilla DEL NERO – Institut Pluridisciplinaire Hubert-Curien
École doctorale :	Université de Strasbourg / Chimie-Physique
Financement de thèse :	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 très peu connus des actions-réactions entre uranium(VI), communautés bactériennes et matières organiques complexes (MO) - des assemblages supramoléculaires de centaines de molécules organiques de propriétés et réactivité distinctes - qui influencent la spéciation et les transferts de l'Uranium(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes de milieux à radioactivité naturelle renforcée.

Cette thèse concerne l'influence de la spéciation sur les transferts de radionucléides dans les écosystèmes terrestres et la description des niveaux et transferts des radionucléides dans l'environnement. 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, la démarche est :

- d'identifier en laboratoire les espèces métallo-organiques aux interfaces U(VI)-minéral (oxyde de fer ou argile)- MO (de référence ou extraites de l'horizon marqué) – bactéries (cultivées à partir de l'horizon) par l'utilisation de techniques avancées (e.g. spectrométrie ESI-FTMS, spectroscopie ATR-FTIR);
- de mettre en regard la spéciation de U(VI) avec des données méta-génomiques sur les communautés bactériennes et des mesures de transferts de l'U aux plantes (Rhizotests).

Durant ces premiers mois de thèse, des expériences sont en cours pour quantifier la désorption / labilité de l'U (et autres métaux) de l'horizon de sol marqué, en fonction du pH et en lien avec la composition de la MO désorbée. Les premiers résultats de fluorescence montrent une dépendance de la quantité de U et MO, et du type de MO désorbée, en fonction du pH (composantes « fulvique » et composantes « fulviques » et « protéiques » de la MO à pH 3 et 5, respectivement). En parallèle, des expériences et analyses par fluorescence et ESI-FTMS sont en cours pour extraire (avec un bon rendement et une bonne représentativité au niveau moléculaire) de la MO de l'horizon, pour débiter les expériences dans les systèmes modèles et interpréter les résultats de labilité.

## SUJET DE LA THÈSE

 Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide/liquide du  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  et  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  dans des fleuves

Doctorante :	Léonore FLIPO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Tuteur de thèse :	Frédéric COPPIN
Directeur de thèse :	Olivier RADAKOVITCH - IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / EDF

L'évaluation de la propagation à moyen et long termes des effluents liquides rejetés dans les environnements aquatiques par l'industrie nucléaire nécessite que les codes de calculs associent des modèles hydro-sédimentaires (flux d'eau et de particules) et de fractionnement solide/liquide des radionucléides. Ce dernier est couramment estimé à partir du modèle du  $K_d$  en raison de sa simplicité et de sa documentation. Cependant, l'hypothèse de l'équilibre instantané et réversible associée à ce  $K_d$  peut-être non vérifiée notamment lorsque les temps de résidence des radionucléides sont courts (comme dans les rivières), que les propriétés physico-chimiques du milieu sont modifiées (zones de confluences) ou suivant l'âge de la contamination de la particule (effet de vieillissement).

L'objectif du projet FRACDYN est d'évaluer si des modèles qui intègrent une ou des cinétiques de distribution solide/liquide permettent des estimations plus fines et réalistes que l'approche à l'équilibre du  $K_d$ . Dans le cadre de la thèse, il s'agira de caractériser expérimentalement la dynamique de fractionnement du  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  et  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ . Ces données expérimentales permettront d'alimenter, de calibrer et de comparer l'apport de deux modèles développés à EDF et à l'IRSN, respectivement à double cinétique (KK) et à couplage d'un équilibre rapide et d'une cinétique lente (E-K).

La première étape de la thèse est de développer un protocole expérimental d'adsorption et de désorption des radionucléides sur des matières en suspension de fleuves du bassin versant du Rhône, présenté par la Figure 1. Les expérimentations seront conduites en fonction du temps de contact des contaminants avec le milieu fermé (en batch) pour suivre des cinétiques allant de l'heure jusqu'au mois. Afin de mieux envisager une approche à l'échelle du bassin versant et pour répondre aux variables d'influence des modèles cinétiques, les paramètres physico-chimiques qui contrôlent les coefficients de distribution dans les fleuves (comme la granulométrie, la teneur en matière organique des particules et la chimie de l'eau) seront mesurés lors des expériences. Une expérimentation préliminaire permettra d'observer l'influence de la charge en suspension et l'effet de compétition entre les radionucléides sur la sorption du fait d'une contamination avec un cocktail de radionucléides.



Une expérimentation préliminaire permettra d'observer l'influence de la charge en suspension et l'effet de compétition entre les radionucléides sur la sorption du fait d'une contamination avec un cocktail de radionucléides.

Figure 1 : Schéma expérimental du suivi des cinétiques d'adsorption et de désorption

## 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 :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur et tutrice de thèse :	Mejdi NEJI et Elisa LEONI
Directeur de thèse :	Stéphane POYET - CEA
École doctorale :	Université Paris-Saclay / SMEMAG
Financement de thèse :	IRSN

Les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire pour le conditionnement et le stockage des déchets radioactifs. Les déchets à conditionner peuvent être de natures très différentes et à cette diversité correspond un vaste panel de formulations de matériaux d'enrobage à base de ciment, le plus souvent de composition complexe avec des ajouts de laitier de haut fourneau et de cendre volante. De telles matrices sont souvent développées *ad hoc*, afin d'assurer les performances de durabilité requises aux colis de déchets durant toute leur durée de vie, de la production jusqu'au stockage. Par ailleurs, une des particularités des matériaux à base de ciment utilisés pour l'enrobage des déchets correspond à leur exposition à l'irradiation dès le plus jeune âge. L'IRSN s'intéresse par conséquent à l'évaluation de l'impact d'un tel phénomène sur les propriétés des matériaux cimentaires pour le conditionnement de déchets radioactifs.

L'objectif de ce projet consiste ainsi à étudier les modifications physico-chimiques pouvant intervenir au très jeune âge, c'est-à-dire durant leurs premières heures d'hydratation d'un matériau cimentaire soumis à un rayonnement ionisant gamma. Le suivi de l'évolution de la minéralogie, de la micro structure et des propriétés mécaniques de ces matériaux, ainsi que l'impact que ces modifications engendrent, articulent ce travail de thèse. Le principal mécanisme à l'œuvre est la décomposition, sous l'effet d'un rayonnement ionisant, de l'eau présente au sein de la matrice cimentaire lors de sa prise. La compréhension des conséquences de ce phénomène appelé radiolyse, permettra d'évaluer l'impact de l'irradiation au jeune âge, c'est-à-dire avant sa prise définitive.

Dans une première partie, une matrice cimentaire modèle est irradiée à l'aide d'une source gamma : une pâte de silicate tricalcique hydraté ( $C_3S-H$ ). Le programme expérimental se complexifie ensuite par l'utilisation de matrices cimentaires industrielles de type Portland avec des proportions d'aluminium variables. L'influence des ajouts, notamment du laitier de haut fourneau, est traitée dans une troisième partie. Enfin, le comportement d'une matrice irradiée au jeune âge puis exposée à un milieu agressif est considéré dans une quatrième partie.

Directement après leur élaboration, les matériaux sont irradiés à l'aide d'une source gamma  $^{60}Co$  pendant 5 jours puis caractérisés structuralement, minéralogiquement et mécaniquement, avant comparaison avec des matrices cimentaires témoins. À terme, il est envisagé d'irradier les matériaux sur de plus longues échéances afin de couvrir l'ensemble du jeune-âge et par conséquent, se rapprocher au mieux de ce que pourrait subir un colis de déchet.

## SUJET DE LA THÈSE

Réponse évolutive des *Daphnia pulex* de la zone d'exclusion de Tchernobyl

Doctorant :	Pierre TECHER
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Frédéric ALONZO
Directeur de thèse :	Frédéric ALONZO (IRSN), Stuart AULD (Stirling UK)
École doctorale :	Université Aix-Marseille / Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN

La compréhension des effets à long terme de faibles doses de rayonnements ionisants sur les écosystèmes, et sur les espèces qui les composent, reste un enjeu majeur en écotoxicologie des radionucléides. Dans ce contexte, un défi de la recherche est de caractériser l'état des populations sauvages vivant dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (CEZ). La biologie évolutive établit que la réponse d'une population exposée à un contaminant (radiologique ou chimique) est de nature adaptative et s'opère par la sélection naturelle des individus les plus aptes à faire face au stress toxique. Cette capacité définie comme la valeur sélective (fitness) peut être évaluée en suivant la survie et la reproduction, deux traits d'histoire de vie critiques pour la dynamique de population.

Récemment, Goodman et al. (2019, 2022) ont étudié les populations de *Daphnia pulex*, une espèce de crustacé planctonique clé de voute des écosystèmes lentiques (étendues d'eau douce calme), issues de différents étangs de la CEZ. Les auteurs montrent que les populations exposées à des débits de dose allant de 0,01  $\mu\text{Gy/h}$  à 200  $\mu\text{Gy/h}$  ne présentent pas de différence significative en termes d'histoire de vie et de valeur sélective (mesurée par le nombre de descendants produits en moyenne par individu au cours de son cycle de vie). L'analyse de la structure génétique des populations montre une diversité corrélée positivement au débit de dose, ainsi qu'une faible dérive génétique, ce qui réfuterait la possibilité d'un effondrement démographique récent. Ces observations suggèrent que les populations se sont potentiellement adaptées aux rayonnements ionisants au fil des décennies d'exposition depuis l'accident.

Le présent projet de thèse vise à vérifier si les populations de *D. pulex* de la CEZ ont acquis une résistance accrue aux rayonnements ionisants. Pour ce faire, des individus issus des différents lacs seront irradiés pendant plusieurs générations sur une gamme de débits de dose variant de 6.5  $\mu\text{Gy/h}$  à 35  $\text{mGy/h}$ . Des mesures quotidiennes de la croissance, survie, et reproduction seront effectuées. Des observations en microscopie électronique testeront l'apparition d'altérations mitochondriales, afin de confirmer une éventuelle atteinte du métabolisme énergétique. Ces données seront analysées à l'aide d'un modèle toxico-cinétique toxico-dynamique (TKTD), basé sur la théorie du Budget Énergétique Dynamique (DEB). Ce travail permettra de préciser la nature de la réponse adaptative développée : acquisition d'une plus grande tolérance au stress toxique induit par les rayonnements ionisants, sélection d'individus dont les traits d'histoire de vie compensent les effets de la toxicité etc.

## SUJET DE LA THÈSE

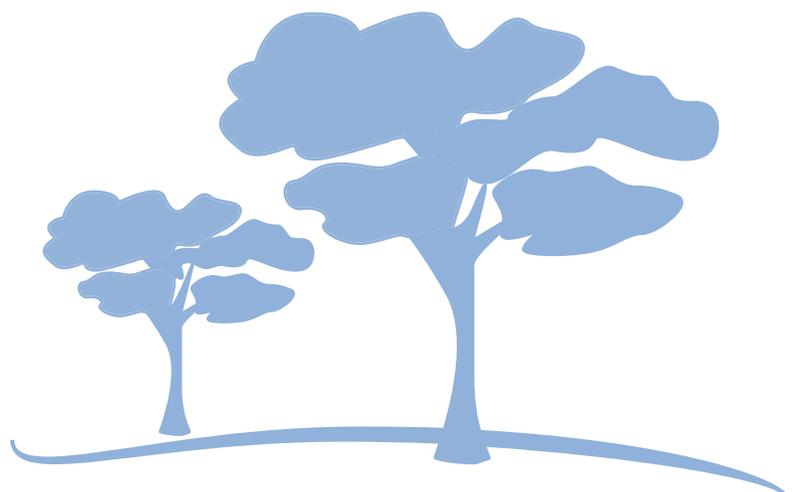
## Trajectoire et résilience des radionucléides dans les grands bassins versants nucléarisés

Doctorant :	Adrien THOMAS
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Tuteur de thèse :	Frédérique EYROLLE
Directeur de thèse :	Frédérique EYROLLE - IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN

Les méthodes d'analyse des conséquences environnementales des rejets chroniques ou accidentels des installations nucléaires soulignent des lacunes de connaissances, notamment sur l'évolution consécutive des niveaux de contamination en radionucléides dans les milieux aquatiques, à court, moyen et long termes, sur les trajectoires de ces contaminants à l'échelle des grands bassins versants nucléarisés français, et enfin sur la capacité de résilience de ces milieux soumis à ces contaminants.

La collecte et l'analyse d'archives sédimentaires sur les marges alluviales des hydrosystèmes, ainsi que dans les compartiments d'accumulation sédimentaire des fleuves, permettent de reconstruire les concentrations des radionucléides à vie moyenne et à vie longue qui ont transité dans ces milieux durant l'ère nucléaire (Vrel, 2012 ; Eyrolle et al., 2019 ; Morereau, 2020). L'objectif est de mieux comprendre les trajectoires d'état des radionucléides à l'échelle des sept grands bassins versants français étudiés, grâce au couplage des jeux de données issus des archives sédimentaires, dont l'approche est quantitative, et des frises socio-historiques associées qui caractérisent les pressions anthropiques, dont l'approche est plus qualitative. Cela conduira à évaluer la résilience des milieux aquatiques face à différents types de contamination, en considérant potentiellement les décisions sociétales telles que les réglementations et normes mises en place.

La capacité de résilience des grands bassins versants face à une contamination radioactive est de préciser les périodes effectives ainsi que la capacité des milieux aquatiques à éliminer naturellement cette contamination. Le but est de collecter des archives sédimentaires sur les sept grands fleuves nucléarisés français, et d'acquérir des jeux de données sur ces fleuves. Des jeux de données sont déjà à disposition pour quatre fleuves, à savoir la Moselle, le Rhin, la Loire et le Rhône, une est en cours de traitement, la Seine, et les deux dernières, la Meuse et la Garonne, ont pour projet d'être collectées et traitées. L'objectif est de mettre en perspective les trajectoires d'état des radionucléides de ces sept grands fleuves, aux caractéristiques géomorphologiques, hydro-sédimentaires et géochimiques contrastées, qui sont soumis à diverses typologies de contaminations radioactives, et ainsi d'évaluer leur capacité de résilience.



# SESSION POSTERS

## Doctorants de 1<sup>re</sup> année

### ► PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

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

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

**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.

**Lucie GOMEZ** - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradations des granulats lors d'une alcali-réaction.

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

**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.

**Rémy PLOIX** - Développement expérimental et numérique d'un modèle de rétention de la pollution particulaire dans une jonction d'un réseau de ventilation.

**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.

**Théo ROUBILLE** - Étude théorique de la microstructure et du comportement des produits de fission dans le combustible d'oxyde d'uranium dopé à l'oxyde de chrome

**Julien SANZ** - Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules : mélanges hybrides et transferts radiatifs.

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

## 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 :	PSN-RES / SCA / LECEV
Tuteur de thèse :	Mouheb CHEBBI
Directeur de thèse :	Bruno AZAMBRE - Université de Lorraine
École doctorale :	Université de Lorraine / C2MP
Financement de thèse :	IRSN

La nécessité de limiter les rejets d'espèces radioactives iodées ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) dans l'environnement constitue un défi majeur dans le domaine de la sûreté nucléaire. Cette limitation repose actuellement sur l'utilisation de charbons actifs (CA) dans les pièges à iode (PAI) implantés dans les réseaux de ventilation des installations nucléaires. Paradoxalement, les tests annuels d'efficacité des PAI génèrent, le plus souvent, les émissions les plus importantes en iode  $^{131}\text{I}$  des installations nucléaires. Ainsi, le remplacement de ces méthodes par des méthodologies de tests non radioactifs constitue un enjeu fort de sûreté nucléaire. La validité de tels essais repose dans un premier temps sur la quantification du mécanisme d'échange isotopique apporté par l'iodure de potassium (KI) utilisé dans les charbons actifs à usage du nucléaire.

La thèse de H. Lin <sup>[1]</sup> a permis de donner des premiers éléments sur l'importance de ce mécanisme en utilisant différents charbons actifs synthétisés à l'échelle industrielle et des méthodologies d'essai complémentaires (coefficients d'épuration, courbes de percée). Plus précisément, la comparaison des courbes de percée de  $\text{CH}_3\text{I}$  stable et de  $\text{CH}_3\text{I}$  radioactif met en évidence une amélioration significative des performances pendant la phase de percée pour un charbon 5%KI en comparaison avec le charbon non-imprégné [Figure 1 (a) et (b)] <sup>[1]</sup>. Une première quantification de la contribution relative à l'échange isotopique a été ainsi réalisée en fonction de la percée, en utilisant un modèle amélioré de Thomas <sup>[2]</sup>.

Dans ce cadre, les travaux de cette thèse auront pour objectif de continuer ces investigations en apportant des améliorations sur l'obtention des courbes de percée de  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$ . D'autre part, des adsorbants synthétisés à l'échelle du laboratoire seront utilisés afin de s'affranchir des hétérogénéités caractérisant les charbons actifs et d'isoler l'échange isotopique. Une meilleure compréhension mécanistique du piégeage sera également assurée. *In fine*, l'objectif de ces travaux sera d'exprimer un coefficient de transposition pour les coefficients d'épuration mesurés par les deux méthodes.

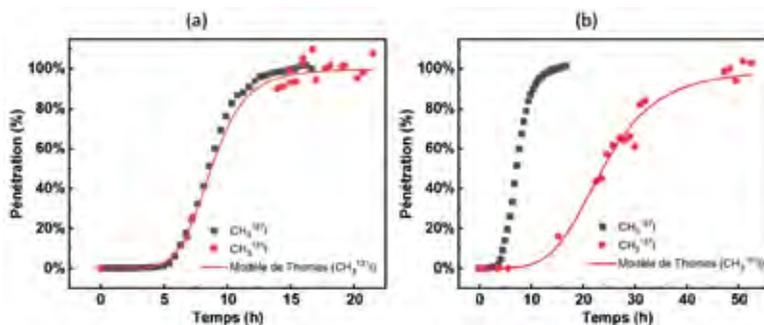


Figure 1. Courbes de percée de  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$  et  $\text{CH}_3^{127}\text{I}$  : a) CA non imprégné b) 5% KI CA ( $[\text{CH}_3\text{I}]$  total = 10 ppmv,  $T = 20^\circ\text{C}$ , débit  $\text{CH}_3^{131}\text{I} = 150 \text{ Bq}\cdot\text{min}^{-1}$ )

[1] M. Chebbi, H. Lin, C. Monsanglant-Louvet, B. Marcillaud, A. Roynette, D. Doizi, 11<sup>èmes</sup> journées de l'AFA, 2022.

[2] R. Apiratikul and K. H. Chu, J. Water Process Eng., 40 (2021) 101810.

## 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 :	01 / 11 / 2021
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Mihail GARAJEU – LMA, Martin IDIART - UNLP
École doctorale :	AMU / Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
Financement de thèse :	ISFIN (AMU) / IRSN

De nombreux changements microstructuraux interviennent dans les aciers de cuve à cause de l'irradiation neutronique (notamment l'apparition de boucles de dislocations et d'amas de solutés). Ces changements représentent la clé pour comprendre et prédire la modification de leurs réponses viscoplastiques (dont le durcissement) et de leurs propriétés à rupture avec l'irradiation. L'objectif de la thèse est d'établir un modèle de comportement micromécanique, à l'échelle du polycristal, en se basant sur une loi viscoplastique cristalline récemment proposée par Monnet et al. pour décrire le comportement d'un acier de cuve irradié. L'objectif principal est donc de proposer un nouveau modèle de comportement homogénéisé, qui puisse être directement intégré dans un code de calculs éléments finis, afin d'estimer les champs de contrainte et de déformation lors de la simulation d'un essai de traction sur éprouvette pré-entaillée [de type C(T)]. Vis-à-vis de l'homogénéisation, toute la complexité de ce problème réside dans la non-linéarité du comportement local des grains et la non-uniformité des champs mécaniques.

Cette thèse se divise principalement en trois étapes. La première étape consiste à implémenter numériquement dans le code de calcul CRAFT, code développé au LMA à base de Transformées de Fourier Rapides, la loi de comportement cristalline proposée par Monnet et al., tout en s'assurant de son optimisation numérique (temps de calcul, précision des résultats, rapidité de la méthode d'intégration, etc.). Pour la deuxième étape, une campagne de simulations numériques en champs complets avec CRAFT est prévue avec prise en compte de la microstructure polycristalline. Les résultats obtenus seront comparés avec des résultats de référence (données de validation, courbes expérimentales) pour validation. Enfin, la troisième étape vise à établir un modèle de comportement homogénéisé pour acier de cuve irradié, au travers d'une méthode d'homogénéisation particulièrement adaptée au présent problème, appelée FOSO ("*Fully Optimized Second-Order homogenization*") et développée par Ponte Castañeda et Song. Il est prévu de définir ce modèle de comportement en champs moyens en utilisant la loi cristalline de Monnet et al., pour acier de cuve irradié dans les grains. Les résultats du modèle de comportement homogénéisé seront comparés à ceux obtenus sur CRAFT, pour évaluer et éventuellement calibrer ce modèle de comportement.

Monnet et al. - *Multiscale modeling of crystal plasticity in Reactor Pressure Vessel steels: Prediction of irradiation hardening*. Ghiath Monnet, Ludovic Vincent, Lionel Gélébart, 2019.

Ponte Castañeda et Song – *Fully optimized second-order homogenization estimates for the macroscopic response and texture evolution of low-symmetry viscoplastic polycrystals*, P. Ponte Castaneda, Dawei Song, 2018

## 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**

---

Doctorant :	Klayne DOS SANTOS SILVA
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC & AMU / LMA
Tuteur de thèse :	Benoit DURVILLE
Directeur de thèse :	Vincent GARNIER – LMA
École doctorale :	AMU / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN, Région PACA, LMA

---

Les Réactions de Gonflement Interne (RGI's) sont des pathologies qui peuvent conduire à une expansion et, par conséquent, une fissuration progressive du béton, réduisant ainsi la durabilité des structures. Dans le cadre d'une approche de prédiction et de suivi de ces pathologies, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des systèmes capables de détecter de manière précoce l'apparition de ces pathologies sur site, de les caractériser et les localiser.

En ce qui concerne les centrales nucléaires, le béton armé et le béton précontraint constituent l'enceinte de confinement, cette enceinte joue le rôle de troisième barrière de confinement et de protection mécanique vis-à-vis des agressions externes. De ce fait, le carottage est proscrit sur ces ouvrages et le développement de techniques de contrôles non-destructifs (CND) est indispensable pour un suivi en service dans le cadre d'une extension de durée de vie prévue à ce jour par l'exploitant à 60 ans.

Les dernières études menées, dans le cadre de la thèse IRSN de Florian OUVRIER-BUFFET (2016-2019), ont démontré, à échelle intermédiaire, l'efficacité des CND par acoustique non linéaire, pour détecter les zones affectées de pathologie, telles que la RAG. En effet, soumis à des oscillations basses fréquences, le matériau béton acquiert des propriétés non linéaires extrêmement sensibles à la dégradation du matériau, et dont le suivi est possible sans intrusion, à grande profondeur.

Le présent sujet de thèse réalisé en coopération avec le LMA (Aix Marseille Université), est lié au volet 3 du consortium CONCRETE qui vise à proposer des solutions pour l'auscultation non destructive des structures. La thèse consistera, à partir des essais précédents en laboratoire, à développer un moyen de contrôle non destructif sur site, et à optimiser la détection précoce de la présence de pathologies de gonflement interne (RAG prioritairement, puis RSI). Ceci fera l'objet d'essais démonstratifs sur des blocs massifs (8 m<sup>3</sup>) du programme ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé), avec calibration de la méthode par comparaison à d'autres techniques de mesures (fibre optiques et capteurs noyés). Le travail s'étendra sur les aspects de focalisation des ondes et de décorrélation des signaux coplanaires, en intégrant les contraintes d'un fonctionnement hors laboratoire, afin de transposer la méthode retenue à grande échelle. A terme, on vise à fournir une tomographie non-linéaire d'un bloc de la plateforme expérimentale ODOBA.

## SUJET DE LA THÈSE

## Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradations des granulats lors d'une alcali-réaction

Doctorante :	Lucie GOMEZ
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSN / RES / SEMIA
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES
Directeur de thèse :	Stéphane MULTON – LMDC et Benoit FOURNIER - ULaval
École doctorale :	Université Paul Sabatier Toulouse 3 / MEGEP
Financement de thèse :	IRSN / Hydro-Québec

La réaction alcali-granulat (RAG) est une pathologie du béton très étudiée car elle peut remettre en cause la sûreté d'installations stratégiques, comme l'enceinte de confinement en béton des réacteurs nucléaires, par une potentielle perte des propriétés nécessaires (étanchéité,...) à son exploitation.

Cette réaction est liée à l'attaque chimique des granulats par la solution basique du béton (ions hydroxydes et alcalins de la solution interstitielle). Les ions silicates ainsi libérés peuvent réagir avec les alcalins et les ions calcium pour former de nouvelles phases (gel alcali-silice) à l'intérieur des granulats. Ces gels d'alcali-silice peuvent entraîner un gonflement et conduire à la fissuration du béton. La cinétique des réactions étant lente, le diagnostic de la RAG est souvent tardif avec une fissuration avancée se manifestant à l'échelle macroscopique. Un modèle numérique prenant en compte les mécanismes à l'échelle mésoscopique est donc nécessaire pour prédire tôt l'endommagement du matériau.

Ici, il est proposé une étude chimio-mécanique. Une modélisation du transport réactif permet de prendre en compte la diffusion des espèces aqueuses et les réactions chimiques dans les phases cimentaires, les granulats et les interfaces granulats/pâte. Le couplage avec la mécanique permettra d'estimer la fissuration inhérente à cette réaction. Cependant, le manque de données expérimentales permettant d'alimenter les modèles de transport réactif dans les granulats est problématique. Pour lever ce verrou, une pré-étude numérique sera mise en œuvre afin d'appréhender la forme et la quantité de silice réactive dans les granulats.

La démarche mise en œuvre allie une étude expérimentale et numérique : la partie expérimentale (Université Laval au Québec) a pour but de caractériser finement les granulats (réactivité et composition minéralogique, dissolution, diffusion) afin d'alimenter le modèle numérique et la partie numérique a pour but de prédire l'évolution de la réaction selon les paramètres initiaux pour connaître l'état d'endommagement dû à la RAG.



*Fissuration du béton due à la RAG [Ichikawa et Miura, 2007] (gauche) ; modélisation XPER de la formation de gel alcali-silice dans des granulats (droite)*

## SUJET DE LA THÈSE

## Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine en alliage de zirconium après sollicitation de type APRP

Doctorant :	Apou Martial KPEMOU
Date du début de la thèse :	13 / 09 / 2021
Laboratoire :	PSN / SEREX / LE2M
Tuteur de thèse :	Jean DESQUINES, Tatiana TAURINES
Directeur de thèse :	Marie-Christine BAIETTO - LAMCOS
École doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Financement de thèse :	EDF

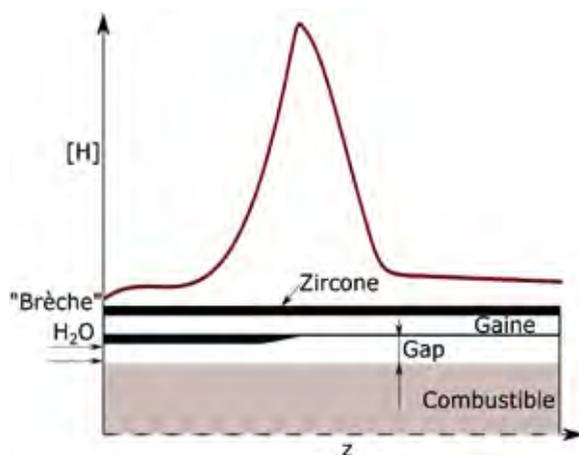
L'IRSN, dans le cadre de la sûreté des centrales nucléaires étudie différents scénarios accidentels hypothétiques. Cette thèse s'intègre dans l'un d'entre eux à savoir l'étude des Accidents de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Ces accidents résultent de l'apparition d'une brèche sur le circuit primaire et conditionnent le dimensionnement des dispositifs de secours.

Lors d'un APRP, les gaines qui constituent la première barrière de confinement, sont soumises à une élévation de température et à une pressurisation interne intensifiée simultanément par cet échauffement et par la dépressurisation du circuit primaire. Il en résulte le ballonnement par fluage des gaines pouvant conduire à leur éclatement pendant la phase de montée en température.

Dans un second temps, la température augmente et se stabilise généralement dans la gamme 900-1200°C. La gaine éclatée est oxydée à l'intérieur au voisinage de l'éclatement par la vapeur d'eau environnante qui pénètre par l'ouverture. Cette oxydation interne conduit à la formation d'une couche de zircon et à un relâchement gazeux d'hydrogène enrichissant d'autant plus l'atmosphère gazeuse interne que l'on s'éloigne de l'ouverture de l'éclatement. Cet hydrogène se substitue progressivement à la vapeur d'eau prélevée par l'oxydation de la gaine. Lorsque la couche de zircon formée est suffisamment fine, la gaine se charge en hydrogène par sa face interne, on parle alors d'hydruration secondaire (voir illustration). Cet environnement oxydant et hydrurant fragilise la gaine, qui peut se rompre sous contrainte axiale soit au niveau de l'éclatement (oxydation + amincissement) ou soit au niveau de la zone d'hydruration secondaire.

Cette thèse vise dans une première phase, à travers des essais analytiques, à mieux comprendre l'influence de différents paramètres sur la localisation du pic d'hydruration secondaire lors d'un transitoire APRP. Les premiers résultats de cette phase indiquent une influence du temps d'exposition au palier d'oxydation sur la localisation de ce pic. L'implémentation d'un premier modèle d'hydruration secondaire

est en cours. En parallèle, la modification du banc ELLIE, permettra de réaliser des essais semi-intégraux, représentatifs de transitoires de type APRP. L'objectif étant de mieux comprendre les phénomènes de fragilisation des gaines et la compétition entre les effets de l'oxydation et de l'hydruration secondaire.



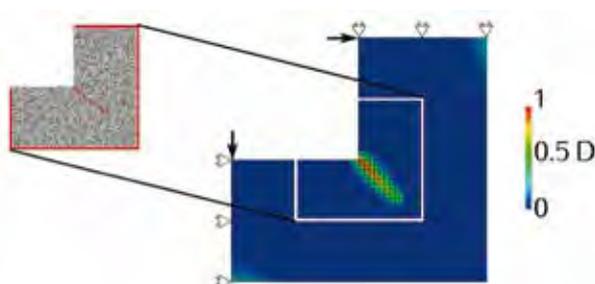
## SUJET DE LA THÈSE

## 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 :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Tuteur de thèse :	Thomas HEITZ (IRSN) et Cécile OLIVER-LEBLOND (ENS)
Directeur de thèse :	Frédéric RAGUENEAU (ENS)
École doctorale :	Paris-Saclay / SMEMAG
Financement de thèse :	IRSN

Perfect leak tightness of the double-walled containment reactor buildings cannot be guaranteed in severe accident conditions (SA). The accident scenario retained in this case considers an internal pressure of 5 bars (absolute) and a temperature of 150°C, the internal atmosphere then being composed of an air-steam mixture and aerosols (fine particles in suspension). Such conditions induce cracking in the first wall of the containment through which leaks are possible. It is therefore necessary to have robust and reliable tools to estimate these leaks.

The objective of the thesis is first, to obtain a realistic three-dimensional cracking pattern using a continuous/discrete two-step approach of a reinforced concrete mock-up. Secondly, use the results provided by the model as input data for fluid mechanics simulations for the assessment of leakage rates in severe containment accident conditions. This is done in parallel with the calibration of the model with the experimental results obtained in the framework of the COBRA program on the MACUMBA facility operated by IRSN.



Couplage éléments finis (global) / éléments discrets (local)  
[C. Oliver-Leblond, 2019]

The experiments consist of cracking two mockups of Representative Structural Volumes (RSV) of a containment wall, then applying different pressure, temperature and hygrometry gradients to either side of them and evaluating the leakage ratios as well as the aerosol retention. The modeling stages are: (1) computation of a continuous damage field with the finite element method (FEM); (2) re-analysis of highly damaged area with a discrete element method (DEM) in order to compute physical crack features; and (3) simulation of the leakage flow rate through the previously computed cracks by a CFD software.

Some of previous studies, such as [Mattallah, 2010], estimated the average crack opening per element via post-processing based on fracture energy regularization, which does not give a good description of the crack parameters (path, opening, roughness length, etc.). On the other hand, Discrete Element Analysis Program (DEAP) has shown its ability to explicitly represent concrete cracking characteristics [C. Oliver-Leblond, 2019] which will be used in this thesis.

At the end of the thesis, it is expected the development of numerical tools for estimating the 3D patterns of complex cracks system in a RSV of a containment wall. These cracking facies integrating different parameters more or less directly from the calculation by discrete elements will be the input data for flow calculations in fluid mechanics.

## References:

- M. Matallah, C. La Borderie, O. Maurel, "A practical method to estimate crack openings in concrete structures", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 34, n° 15, pp. 1615-1633, 2010.  
C. Oliver-Leblond, "Discontinuous crack growth and toughening mechanisms in concrete: A numerical study based on the beam-particle approach", Engineering Fracture Mechanics, vol. 207, pp. 1–22, 2019.

## SUJET DE LA THÈSE

**Développement expérimental et numérique d'un modèle de rétention de la pollution particulaire dans une jonction d'un réseau de ventilation**

Doctorant :	Rémy PLOIX
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2021
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LEMAC
Tutrice de thèse :	Jeanne MALET
Directrice de thèse :	Jeanne MALET – IRSN, Evelyne GEHIN – UPEC
École doctorale :	UPEC / SIE
Financement de thèse :	UPEC

Dans l'industrie, on trouve de nombreuses installations de ventilation, pouvant véhiculer des aérosols qui représentent des risques bactériologiques, radiologiques, mais également d'incendie et d'explosion. Il est donc important d'être capable d'estimer la capacité d'un réseau de ventilation à capter un aérosol, mais également localiser et quantifier les dépôts.

Pour répondre à ce problème, l'IRSN a mis en œuvre le programme DEPART (Dépôt de Particules) reposant notamment sur des essais sur l'installation DIESE (plateforme expérimentale MISTRAL), un réseau de ventilation d'environ 60m de long, incluant plusieurs singularités (coude, jonction, réduction). Une première thèse a été réalisée par D. Costa, qui a notamment permis de développer la technique de mesure du dépôt des aérosols dans l'objectif de le caractériser dans les coudes de réseaux de ventilation.

L'objectif de la thèse est de disposer d'une base de données permettant le développement des corrélations de dépôt en gaine, implémentable dans le code SYLVIA. Pour cela, les essais expérimentaux seront complétés par des simulations numériques. Un modèle numérique de la jonction sera développé, en se basant sur les essais portant sur le coude et la jonction.

Un planning global de la première année a été réalisé. On y retrouve une première partie de prise en main de la problématique conduisant à la définition du cas de référence pour les essais.

Dans cette partie, une bibliographie a été démarrée sur le dépôt des aérosols et l'aéraulique des jonctions.

En parallèle, le protocole de mesure du dépôt, a été pris en main via la participation à d'autres essais sur DIESE pour le programme DEPART. De plus, un travail sur les mesures de grandeurs turbulentes a été entamé. Enfin, cette période est aussi dédiée à l'anticipation des besoins expérimentaux (commandes de matériels, de tronçons, besoins PIV, capteurs ...).

Une deuxième partie du planning de cette première année concernera la mise en place de la simulation du cas de référence dans l'objectif de définir la grille d'essais et la position des points de mesure du dépôt.

Enfin, la troisième partie du planning prévoit une étude aéraulique laser en fin d'année, afin de valider les écoulements turbulents de la jonction avant de commencer la caractérisation du dépôt.

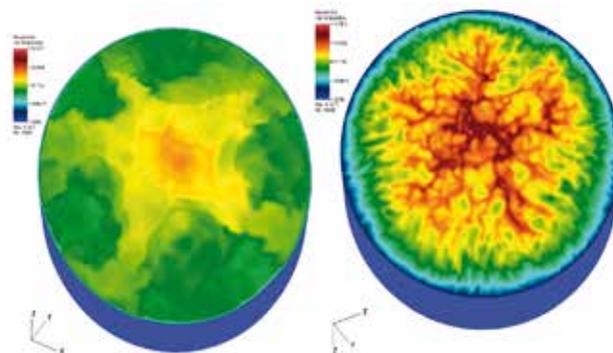
## SUJET DE LA THÈSE

**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 / 11 / 2021
Laboratoire :	IRPHE
Tuteur de thèse :	Laure CARENINI - IRSN
Directeur de thèse :	Michael LEBARS - IRPHE
École doctorale :	AMU / Sciences pour l’ingénieur(e)
Financement de thèse :	IRSN / IRPHE / CEA / EDF

L’IRSN a coordonné de 2015 à 2019 le projet IVMR (*In-Vessel Melt Retention*) portant sur l’étude de la stratégie de rétention du corium en cuve en cas d’accident grave de réacteur nucléaire et financé par la commission européenne. A la suite de ce projet, une nouvelle méthodologie d’évaluation de cette stratégie s’appuyant sur l’utilisation de codes permettant de décrire l’évolution transitoire de l’accident a été proposée. Les principales incertitudes dans les évaluations actuelles ont également été identifiées. Elles portent notamment sur le flux thermique maximal obtenu en paroi externe de la cuve au niveau de la couche métallique supérieure, qui dépend de l’évaluation des transferts thermiques dans une fine couche de métal, ainsi que de la cinétique de croissance de cette couche de métal au-dessus du bain de corium.

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 les deux aspects suivants menés séquentiellement : simulations numériques 3D DNS (*Direct Numerical Simulation*, toutes les échelles de la turbulence sont résolues), avec le code NEK500, déjà utilisé pour des calculs 2D (et 3D prospectifs) sur cette problématique et adaptation/ utilisation d’un banc expérimental existant à l’IRPHE. Ce dernier permettra d’obtenir des résultats en similitude sur des mouvements de gaz par vélocimétrie par image de particules (PIV). L’objectif est d’établir des lois d’échelle des propriétés moyennes (flux sur le côté, température moyenne en volume et sur le dessus), mais aussi diverses statistiques (fluctuations, déviations standard, max/min, ...) afin de caractériser l’écoulement et d’en déduire une modélisation utilisable à l’échelle réacteur.



*Exemple de visualisation de la température instantanée dans la couche de métal, vue du dessus (à gauche) et vue du dessous (à droite) pour une simulation 3D à  $Ra = 1e7$  et  $Pr=0.1$ .*

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude théorique de la microstructure et du comportement des produits de fission dans le combustible d'oxyde d'uranium dopé à l'oxyde de chrome

---

Doctorant :	Théo ROUBILLE
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	Roland DUCHER
Directeur de thèse :	Yves PIPON – IP2I Lyon 1
École doctorale :	Université Lyon 1 / PHAST
Financement de thèse :	IRSN

---

Aux Etats-Unis et en Europe notamment, les industriels cherchent à développer des éléments combustibles dits E-ATF (*Enhanced Accident Tolerant Fuel*), dont le comportement, en cas de perte de réfrigérant primaire, permettrait de retarder significativement la dégradation de la première barrière de confinement et la production d'hydrogène. Framatome a élaboré un combustible  $UO_2$  dopé à l'oxyde de chrome, nommé GAIA et actuellement introduit dans plusieurs pays d'Europe et aux Etats-Unis. Ce combustible est caractérisé par une microstructure à gros grains qui permet d'améliorer la capacité de rétention des produits de fission dans la matrice.

Cet effet de l'oxyde de chrome sur le relâchement des gaz rares a déjà été observé expérimentalement mais les mécanismes à l'origine de la rétention des PFs et en particulier le rôle du dopant sur la nature des défauts et la diffusion des PFs n'ont pas été clairement identifiés. Durant cette thèse, des méthodes de modélisation à l'échelle atomique (théorie de la fonctionnelle de la densité et méthodes de dynamique moléculaire) seront utilisées pour étudier ces mécanismes difficilement accessibles par l'expérience, et ainsi déterminer des propriétés d'intérêt pour simuler le comportement de ce combustible en situation accidentelle. L'objectif est donc, au travers de la simulation, d'étudier les mécanismes de migration des PFs dans l' $UO_2$  dopé au chrome, afin de pouvoir les comparer au combustible  $UO_2$  non-dopé. La détermination des coefficients de diffusion des produits de fission tel que le césium et le molybdène dans les combustibles dopés chrome permettrait d'enrichir le domaine de qualification des codes de relâchement de l'IRSN (MFPR-F) et de participer à l'expertise des dossiers de sûreté transmis à l'appui de l'exploitation de ces futurs combustibles en réacteur.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules :  
mélanges hybrides et transferts radiatifs

Doctorant :	Julien SANZ
Date du début de la thèse :	25 / 10 / 2021
Laboratoire :	PSN-RES / SA21 / LIE
Tuteur de thèse :	Fabien DUVAL
Directeur de thèse :	Yohan DAVIT - IMFT
École doctorale :	INP Toulouse / Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés
Financement de thèse :	IRSN

Les risques d'explosion de poussières sont fréquemment rencontrés dans les installations industrielles où les composés pulvérulents mis en jeu sont d'une grande diversité. Dans le cadre des études de sûreté menées à l'IRSN, ce risque est par exemple envisagé lors des opérations de démantèlement des réacteurs UNGG (*Uranium Natural Graphite Gaz*) et dans les scénarios d'accident de perte de vide dans le tore de l'installation ITER. Dans le premier cas, les poussières constituées de particules métalliques et de graphite proviennent du vieillissement des caissons et des opérations de démantèlement. Dans le deuxième cas, les poussières remises en suspension en cas d'entrée d'air proviennent de l'érosion des parois du tore par le plasma et sont constituées de tungstène et de béryllium.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du développement d'un outil de calcul prédictif visant à caractériser l'explosivité d'un mélange gazeux chargé en particules. Il s'agit en particulier de caractériser le mélange au travers de la vitesse laminaire de flamme qui, comme pour les mélanges gazeux, constitue une propriété intrinsèque et une donnée d'entrée pour les outils d'évaluation. L'outil de calcul sera ainsi utilisé comme pré-processeur d'un calcul CALIF<sup>3</sup>S-P<sup>2</sup>REMICS, à la manière de CHEMKIN ou CANTERA pour les mélanges gazeux. Un tel outil est indispensable, dans la mesure où le nombre de paramètres (composition, granulométrie...) est trop grand pour permettre une exploration expérimentale systématique.

Les travaux menés au cours d'une première thèse sur le sujet ont permis de développer, dans le cadre d'une technique de changement d'échelle basée sur la méthode de moyenne volumique, un code de simulation Euler-Lagrange pour la combustion de particules de graphite. Il s'agit de poursuivre les développements pour des particules métalliques. Pour ce type de particules, les transferts radiatifs jouent un rôle important sur la propagation du front de flamme et il s'agira de proposer un modèle macroscopique dans le cadre de la technique d'échelle utilisée précédemment. Les travaux en cours se concentrent sur l'oxydation de particules métalliques, en particulier les particules d'aluminium, et sur la modélisation des transferts de masse. Il s'agit de tenir compte de la fusion du cœur d'aluminium, de la réaction hétérogène sur la couche d'alumine ainsi que de la vaporisation et la combustion d'aluminium gazeux dans le modèle d'oxydation. On s'intéressera ensuite à des mélanges hybrides, constitués de différents types de particules, pour lesquels il n'existe pas d'approche prédictive.

## 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 :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Tuteur de thèse :	Georges NAHAS
Directeur de thèse :	Stéphane MULTON - Université Paul Sabatier
Co-directeur :	Thierry VIDAL - Université Paul Sabatier
École doctorale :	Université de Toulouse / Mécanique, énergétique, génie civil, procédés
Financement de thèse :	H2020 Projet ACES

Les réactions de gonflement interne (RGI) peuvent entraîner la dégradation du béton en raison de l'expansion induite par ces dernières. Les RGIs comprennent classiquement la réaction sulfatique interne (RSI), la réaction alcali-granulat (RAG) et l'apparition des deux simultanément. En effet, les RGIs sont courantes dans les structures massives en béton, comme les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires ou encore les barrages, pour lesquels un échauffement important a pu se produire au jeune âge. De plus, des granulats réactifs ont pu être utilisés lors de la phase de construction. Ces structures sont bi-axialement comprimées par des câbles de précontrainte qui engendrent des déformations de fluage. Ces phénomènes doivent donc être étudiés et quantifiés, surtout si l'on envisage de prolonger la durée d'exploitation de ces installations.

Dans le cadre du projet européen H2020/ACES qui s'intéresse à la caractérisation, à la prédiction et à la surveillance des RGIs dans les structures nucléaires, l'IRSN contribue en fournissant des outils pour la modélisation et l'inspection non destructive.

L'objectif de la thèse est d'étudier l'effet de la précontrainte sur le développement des RGIs, d'identifier les paramètres des modèles existants afin de prédire le comportement d'ouvrages en béton armé et en béton précontraint.

Ce travail de doctorat vise donc à réaliser un programme expérimental dans des conditions réalistes pour étudier l'effet de couplage des RGIs et du fluage. Afin d'être représentatif de l'histoire subit au jeune âge d'un ouvrage massif, un cycle de température en enceinte climatique en conditions humides sera appliqué pour garantir le développement de la RSI. Pour le développement de la RAG, une température proche de 38°C sera également appliquée pendant la phase de conservation des corps d'épreuve.

Ensuite pour l'analyse des résultats, les états de contraintes initiaux seront déterminés par simulations numériques avec des modèles existants. Les paramètres du modèle de couplage RGIs/précontrainte seront identifiés afin de caractériser ce couplage. Enfin, une extrapolation des résultats sera effectuée pour l'étude du comportement à long terme d'une enceinte de confinement atteinte par une RGI au cours de son exploitation. La comparaison des résultats avec les mesures d'auscultation de l'enceinte atteinte d'une pathologie sur une période donnée permettra de valider la démarche et assurer la robustesse de l'extrapolation étudiée.

Des bâtis originaux ont été spécialement conçus pour cette étude afin d'induire un état de contrainte de compression biaxiale. Des études préliminaires de la métrologie par extensométrie sont en cours pour



optimiser la mesure de la déformation résultant du couplage des RGIs et du fluage dans différentes conditions mécaniques et environnementales. Deux prototypes originaux sont disponibles depuis peu et seront bientôt testés avant le lancement de la campagne d'essais prévue au mois de mars 2022.

► LA SOIRÉE TABLE RONDE - DÉBAT  
LUNDI 28 MARS  
20h55 Salle Riviera

## Empreinte carbone de la recherche : que pèse-t-elle, comment la mesurer, comment la réduire ?

Les chercheurs ont joué un rôle de premier plan pour alerter sur les changements globaux en cours. Au travers du GIEC et de l'IPBES, ils ont fait émerger un consensus scientifique international sur la réalité du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité. Ils ont formulé dans leurs rapports des recommandations aux gouvernants du monde et appelé l'Humanité à repenser ses modes de vie et de production. En réponse, la France s'est fixé des objectifs ambitieux : diminution de 40 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, neutralité carbone en 2050.

Les atteindre nécessite un effort généralisé impliquant l'ensemble des secteurs d'activité. Qu'en est-il du secteur de la recherche ?

Témoins et lanceurs d'alerte, les chercheurs doivent aussi être acteurs du vaste mouvement de transition qu'ils ont contribué à enclencher. Les bâtiments qui abritent leurs laboratoires, les plateformes expérimentales et les moyens numériques qu'ils utilisent, les missions, conférences et réunions qui les conduisent à parcourir le monde ont un impact sur le climat et l'environnement. Il convient de le mesurer et de le réduire.

Lancé en 2019, le collectif Labos 1point5 s'est attelé à la tâche. Regroupant plus de 2 000 chercheurs provenant de toutes les disciplines, il s'est mis en place avec la volonté d'emmener l'ensemble de la communauté de recherche française dans une démarche de transformation axée sur la réduction de son empreinte environnementale. Le collectif a commencé avec ses propres moyens et commencé à développer un outil - GES1point5 - qu'il propose aux chercheurs et laboratoires pour estimer leur bilan de gaz à effet de serre (BGES).

Bénéficiant très tôt du soutien institutionnel du CNRS, l'initiative s'est récemment structurée sous la forme d'un groupement de recherche, le GDR Labos 1point5, auquel l'INRAE et l'ADEME se sont associés. Le GDR se propose d'aborder la question de l'empreinte carbone de la recherche en la faisant entrer dans le champ de la méthode scientifique. Au-delà de l'estimation, il ambitionne de s'attaquer à la réduction en observant les pratiques, en étudiant les moteurs et les freins et en accompagnant des expérimentations.

La soirée débat proposée le 28 mars sera l'occasion de prendre connaissance de la manière dont ce travail se met en place et de s'interroger sur l'implication possible de l'IRSN, de ses équipes de recherche et de ses chercheurs.

5<sup>e</sup> ÉDITION  
MARDI 29 MARS 2022

20h45  
SALLE RIVIERA DU CLUB  
LES TERRASSES DE SAINT PAUL DE VENCE  
ET EN DIRECT SUR YOUTUBE ET FACEBOOK

9  
DOCTORANTS  
PRÉSENTENT  
LEUR THÈSE  
EN 3 MINUTES

# 3 MINUTES POUR UNE THÈSE

Remise du prix  
le 30 mars à 19h salle Riviera



### 3 minutes pour une thèse

#### Cinquième édition pour le concours d'éloquence « 3 minutes pour une thèse » de l'IRSN !

Inspiré du concours international « Ma thèse en 180 secondes », le défi proposé aux doctorants est le suivant : présenter leur sujet de recherche en trois minutes, en termes simples et imagés, de la façon la plus claire, concise et convaincante possible. Ils ne peuvent s'appuyer que sur une seule diapositive. Le principal objectif de l'exercice est pour eux de développer leurs compétences en communication orale, en concision et en pédagogie.

Un défi de taille qui permet aux présentations scientifiques de sortir, avec légèreté, des sentiers battus.

Le concours sera animé par Thierry Bourgois et Sandrine Marano.

Neuf valeureux doctorants se sont portés candidats :

- Yara Barakat (voir le résumé de sa thèse p. 81)
- Sarah Braga-Cohen (voir le résumé de sa thèse p. 13)
- Coralie Carrier (voir le résumé de sa thèse p. 37)
- Mohamad Farhat (voir le résumé de sa thèse p. 30)
- Marie Frerejacques (voir le résumé de sa thèse p. 45)
- Raphaël Gavart (voir le résumé de sa thèse p. 87)
- Julie Pouya (voir le résumé de sa thèse p. 80)
- Aurélien Riot (voir le résumé de sa thèse p. 33)
- Charlotte Dewitte (voir le résumé de sa thèse p. 78)

Le prix pour cet exercice de haute volée est la représentation de la thèse du gagnant sous forme d'une BD de 2 planches. Les autres participants verront la leur représentée en strips de 3 ou 4 cases.

Pour mémoire, le concours Ma thèse en 180 secondes (MT180) est un concept construit au Québec en 2012 par L'association des savoirs francophones (Afcas) à partir du Three minute thesis (3MT) conçu en 2008 par l'Université du Queensland (Australie). L'Afcas a très vite œuvré pour l'étendre à l'ensemble des pays francophones. En France, le concours est organisé par des regroupements d'universités volontaires avec l'appui du CNRS et de la Conférence des présidents d'université (CPU).

➤ LA SOIRÉE DU MERCREDI 30 MARS  
RÉSERVÉE AUX DOCTORANTS



**LA COLLE-SUP-LOMP**  
JOURNÉES DES THÈSES 2022  
**L'ADIN**

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**VENEZ AVEC VOS PLUS  
BEAUX DÉGUISEMENTS !**

**30/03/2022**  
**SOIRÉE**  
**FLUO**

**PRIX TRÈS SPÉCIAL POUR LE  
MEILLEUR COSTUME !**

**Maquillages et accessoires fluo mis à dispo par l'ADIN**

## ➤ 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.

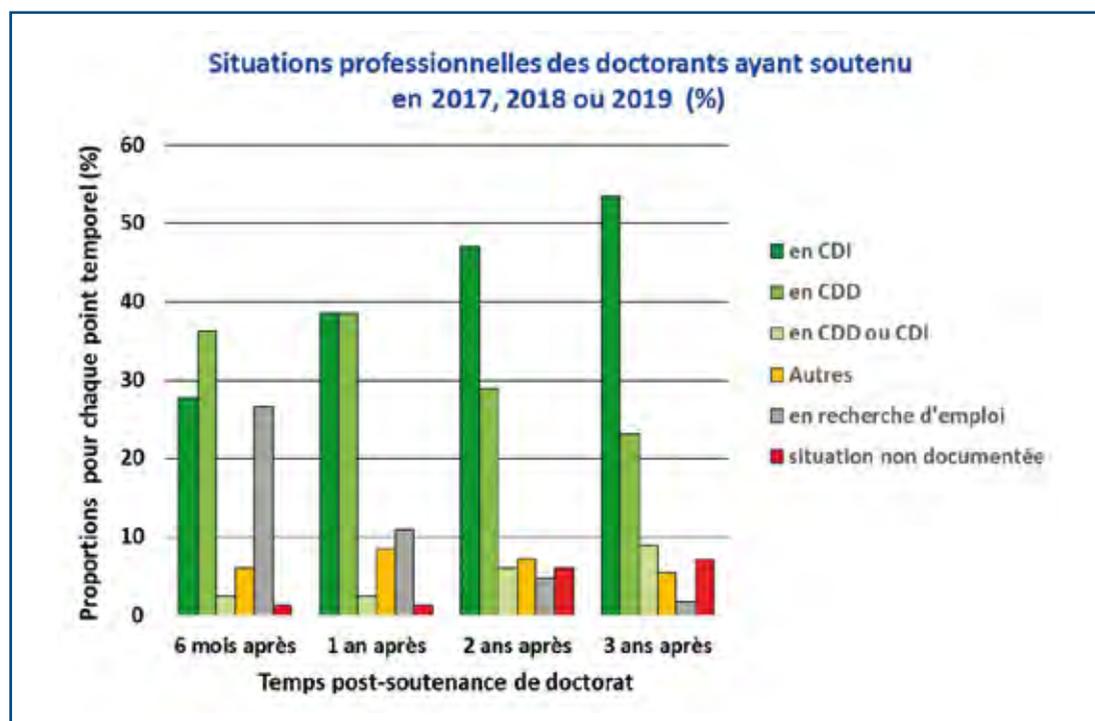
## DEVENIR PROFESSIONNEL DES DOCTORANTS DE L'IRSN, GENERATIONS 2017 À 2019

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 (nombre de personnes)	UR ENVIRONNEMENT	UR RADIOPROTECTION HOMME	UR 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/L\\_etat\\_de\\_l\\_enseignement\\_superieur\\_de\\_la\\_recherche\\_et\\_de\\_l\\_innovation\\_resume/](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR14_RESUME/L_etat_de_l_enseignement_superieur_de_la_recherche_et_de_l_innovation_resume/)

# Besoin d'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE ?

## Ressources Documentaires, abonnements et veilles

 Ressources documentaires et abonnements du SEARCH	 Consulter la liste des Ouvrages de la bibliothèque du SEARCH	 Commander un ouvrage
 Veilles du SEARCH	 <a href="https://myirsn.proton.intra.irsn.fr/IRSN/dirsni_5911/ressources-documentaires-abonnements-et-veilles">https://myirsn.proton.intra.irsn.fr/IRSN/dirsni_5911/ressources-documentaires-abonnements-et-veilles</a>	

*RDV sur le nouvel intranet*



Extrait du livre de Sibeby Harris : 'Quoi ? c'est ça le top bang ?' aux éditions du Seuil

Vos contacts : [myriam.dulor@irsn.fr](mailto:myriam.dulor@irsn.fr) et [valerie.salmon@irsn.fr](mailto:valerie.salmon@irsn.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH

**IRSN**  
Institut  
de  
radioprotection  
et  
de  
sûreté  
nucléaire

# JEUNES CHERCHEURS

## Un accès facilité aux connaissances

### Découvrez ASK

# IRSN [ASK

IRSN  

**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

**IRSN**  
Institut  
de Radioprotection  
et de Sûreté  
Nucléaire

# JEUNES CHERCHEURS

soyez ACTEURS de l'OPEN ACCESS à l'IRSN

## DÉCOUVREZ



&



Le portail des  
archives ouvertes  
HAL-IRSN

 <http://athena/athena/index.jsp>

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



**ATHENA facilite la diffusion de vos publications écrites et communications à congrès en automatisant dans l'archive nationale ouverte et pluridisciplinaire HAL.**

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

Votre Contact : [audrey.legendre@irsna.fr](mailto:audrey.legendre@irsna.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH



## Problème de sens & enjeux scientifiques

### Les archives au service du chercheur



#### *Archiver les sciences ou les manières de chercher ?*

Un travail de documentation est en cours sur les archives personnelles de Jean Piaget (1896-1980). Il s'agit d'étudier les nombreux aspects de « l'industrie » Piagetienne : des modes de construction d'un champ disciplinaire – la psychologie génétique –, à la transmission du savoir autour de Piaget et de ses collègues, en passant par les différents réseaux et les diverses stratégies de carrière qu'ils avaient mis en place. La question de son environnement de travail fait également partie de cette recherche.

© Archives Jean Piaget

*Médiateur entre le(s) document(s) et vous, grâce à l'expertise de l'archiviste vous connaissez le contexte général de production des documents que vous allez pouvoir consulter et vous cernez mieux ce que vous pouvez y trouver, donc y chercher !*



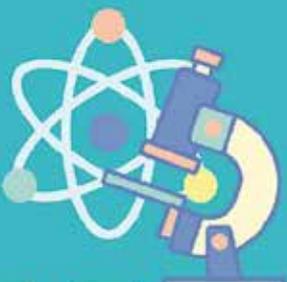
Rendez-vous sur **SPARK Archives** pour consulter les dossiers d'archives de l'IRSN ou contactez les archivistes !



Vos contacts : [nathalie.doucain@irsn.fr](mailto:nathalie.doucain@irsn.fr) et [camille.bouchain@irsn.fr](mailto:camille.bouchain@irsn.fr)



DTR / D2MC2 / SEARCH



Découvrez

L'ADiGN

ASSOCIATION  
DES DOCTORANTS  
DE L'IRSN

## Nos missions ?

Souder les doctorants des différents sites de l'IRSN à travers divers événements : afterworks, week-end 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

## Comment nous rejoindre ?

Envoyez nous un mail à  
**ADIN@IRSN.FR**  
pour recevoir le formulaire  
d'inscription. C'est gratuit !

## Notre bureau



Sarah Braga Cohen  
Présidente

Marie Frerejacques  
Secrétaire



Coralie Carrier  
Trésorière

Manon Guillou  
Secrétaire Adjointe



Quentin Tallon  
Responsable Evénements  
Nord



Enya Mobio  
Responsable Evénements  
Sud

{ ASTHEC }

Association des  
THEsards de Cadarache




**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE



**Centre de Cadarache**

Grand pôle de recherche sur les énergies

2150 salariés CEA - 1000 salariés IRSN

350 doctorants, stagiaires, apprentis

1000 salariés d'entreprises extérieures



Parc naturel du Luberon    Parc naturel du Verdon

Cadarsat

Albi en Provence

Marsat

CEA Cadarache  
13108 St Paul lez Durance Cedex

Ré trouvez de nombreuses informations sur notre site

[www.asthec.org](http://www.asthec.org)



Facebook: ASTHEC



Et n'hésitez pas à nous contacter via l'adresse [contact@asthec.org](mailto:contact@asthec.org)

## II Sorties sportives

Une région riche et variée qui permet de faire : des **randonnées**, des **descentes du Verdon en kayak**, excursions Calanques etc...



## II Sorties mondaines

Des **soirées** dans un restaurant ou activité particulière (billard, bowling, etc...) souvent sur Aix en Provence.



## II Visite de labo

De nombreuses installations à découvrir sur le centre qui permettent des **visites** autour de croissants et pains au chocolat.



## II Fête de la Science AEP

**Sensibilisation** du public français à l'énergie nucléaire et à toutes les activités scientifiques de Cadarache



## II Weekend d'intégration

Afin de ne pas se sentir seul, un **Week-End d'Intégration** ou WEI est organisé dans le but de faire connaissance et prendre un peu de bon temps.

L'année dernière :

- Deux nuits à Embrun ,
- Air Board,
- Raquette,
- Apéritif,
- Jeux de groupe



## INDEX DES PRÉSENTATIONS

Karim ABBAS	PSN-RES/SCA/LECEV	130
Sirine AL DANDACHLI	PSN-RES/SEMIA/LSMA	56
Lucie ANCEL	PSE-SAN/SERAMED/LRAcc	110
Polina ARSENTEVA	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	14
Mohamed Haythem BAHLOULI	PSE-ENV/SEDRE/UEMIS	120
Mathilde BANJAN	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	107
Marion BAQUES	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	106
Yara BARAKAT	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	81
Lydia BENSEMMANE	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	68
Mohammed BENSIALI	PSE-SAN/SDOS/LEDI	21
Nathan BODEREAU	PSE-ENV/SRTE/LRTA	93
Hanane BOUNOUAS	PSE-ENV/SRTE/LRC	121
Sarah BRAGA COHEN	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	13
Aubin BRUNEL	PSN-RES/SA2I/LIE	86
Clement CAR	PSE-ENV/SRTE/LECO	17
Coralie CARRIER	PSE-ENV/SAME/LERCA	37
Nicolas CATHELIN	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	122
Loïc CHAIX	PSN-RES/SEMIA/LSMA	131
Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY	PSN-RES/SA2I/LIE	84
Julien CLEMENT	PSN-EXP/SES/LMAPS	28
Jinjiang CUI	PSN-RES/SAM/LETR	102
Louise DARRICAU	PSE-ENV/SEDRE/LELI	72
Antonin DESCHEMPS	PSE-SAN/SERAMED/LRAcc	20
Charlotte DEWITTE	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	78
Klayne DOS SANTOS SILVA	PSN-RES/SEREX/L2EC	132
Jad EL ALAM	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	79
Youness EL OUARTASSY	PSE-SAN/SESUC/BMCA	40
Louis ERMENEUX	PSE-SAN/SDOS/LDRI	22
Mohamed Yassir ERRAHMANI	PSE-SAN/SESANE/LEPID	97
Mohamad FARHAT	PSN-RES/SEREX/L2EC	30
Julie FENDLER	PSE-SAN/SESANE/LEPID	111
Séléna FERRERES	PSE-ENV/SRTE/LR2T	123
Léonore FLIPO	PSE-ENV/SRTE/LRTA	124
Anaïs FOUCAULT	PSE-SAN/SESANE/LEPID	96

... / ...

Théo FRECHARD	PSE-SAN/SESANE/LRTOX	112
Marie FREREJACQUES	PSE-SAN/SESANE/LRSI	45
Kévin FRÖHLICHER	PSN-EXP/SNC/LN	64
Raphaël GAVART	PDS-DEND/SESN/BMAX	87
Mallia GEIGER	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	67
Tingting GENG	PSE-ENV/SEDRE/LELI	70
Emeline GEORGES	PSN-RES/SA2I/LEF	58
Loïc GISSELBRECHT	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	108
Lucie GOMEZ	PSN-RES/SEMIA/LSMA	133
Manon GUILLOU	PSE-SAN/SERAMED/LRAcc	12
Sandra GYASI	PSN-RES/SAM/LETR	101
Safir HADDAD	PSN-RES/SA2I/LIE	59
Rémi HANNOTEL	PSE-SAN/SESUC/LERN	113
Rémy HOARAU BELKHIRI	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	125
Jérémie JANIN	PSN-RES/SA2I/LIE	85
Martin JESTIN	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	66
Apou Martial KPEMOU	PSN-RES/SEREX/LE2M	134
Kévin LALANNE	PSE-SAN/SDOS/LMDN	75
Géraldine LANDON	PSE-SAN/SESANE/LRSI	46
Elouan LE FESSANT	PSN-RES/SEREX/L2EC	100
Coralie LE MAOUT ALVAREZ	PSN-RES/SEREX/L2EC	103
Marie LECOQ	PSN-RES/SCA/LECEV	31
Ronan LELIEVRE	PSE-SAN/SDOS/LMDN	114
Julie LOPES	PSE-SAN/SESANE/LEPID	98
Juan Esteban LUNA VALENCIA	PSN-RES/SEMIA/LEMC	63
Joe MAALOUF	PSN-EXP/SES/LMAPS	26
Anaëlle MAGRE	PSE-ENV/SAME/LMRE	38
Paul MALFRAIT	PSE-ENV/SAME/LMRE	36
Zafilaza Armi MANOROSOA	PSN-RES/SEMIA/LSMA	55
Zeinab MAWASSY	PSE-ENV/SRTE/LR2T	71
Modou MBAYE	PSN-RES/SCA/LPMA	51
Mahinour MOBASHER	PSE-SAN/SDOS/LDRI	115
Enya MOBIO	PSE-SAN/SDOS/LMDN	116
Omar NAJJAR	PSN-EXP/SES/LMAPS	135

... / ...

Julie NGUYEN SADASSIVAME	PSN-RES/SEREX/L2EC	32
Dina OKHRIMCHUK	PSE-ENV/SRTE/LR2T	92
Rémy PLOIX	PSN-RES/SCA/LEMAC	136
Julie POUYA	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	80
Florian REIN	PSN-RES/SAM/LEPC	137
Emmanuel REYES	PSN-RES/SCA/LPMA	50
Goran RIAZI	PSE-SAN/SESANE/LRTOX	44
Aurélien RIOT	PSN-RES/SAM/LETR	33
Théo ROUBILLE	PSN-RES/SAM/LETR	138
Laurie SAINT CRIQ	PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	42
Florian SALIOU	PSE-SAN/SESANE/LRTOX	117
Julien SANZ	PSN-RES/SA2I/LIE	139
Magali SCHIANO DI LOMBO	PSE-ENV/SRTE/LECO	16
Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA	PSN-RES/SAM/BAAM	48
Thomas SEYER	PSE-ENV/SRTE/LRTA	90
Charlie SIRE	PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	41
Ahmad SLEIMAN	PSE-SAN/SDOS/LMDN	76
Déo-Gratias Kily SOURABIE	PSE-ENV/SRTE/LRC	91
Giuseppe SPINA	PSN-RES/SEMIA/LSMA	62
Rita TABCHOURY	PSN-EXP/SES/LMAPS	140
Quentin TALLON	PSE-SAN/SERAMED/LRAcc	118
Pierre TECHER	PSE-ENV/SRTE/LECO	126
Yann THIBAUT	PSE-SAN/SDOS/LDRI	74
Adrien THOMAS	PSE-ENV/SRTE/LRTA	127
Clément TOSI	PSN-RES/SEMIA/LSMA	54
Maryam TRAD	PSN-EXP/SES/LMAPS	27
Laura VASTIER	PSN-RES/SAM/BAAM	60
Alexandra WARTEL	PSN-SRDS/SHOT/LSHS	23
Linkai WEI	PSN-RES/SAM/LEPC	49

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

### **PDS : Pôle Défense Sécurité et non prolifération**

**PDS-DEND:** Thématique Direction de l'expertise nucléaire de défense et de sécurité

**PDS-DEND / SESN:** Service d'études en sécurité nucléaire

**BMAX:** Bureau d'étude et de modélisation des effets des armes et explosifs

### **PSN : Pôle Sûreté Nucléaire**

**PSN-RES:** Thématique 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

**BEAM:** Bureau d'études des accidents majeurs

**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

**LEMC:** Laboratoire d'étude et de modélisation du combustible

**PSN-EXP:** Thématique Expertise de sûreté

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

**LN:** Laboratoire de neutronique

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

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

**PSN-SRDS / SHOT:** Service Homme Organisation Technologie

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

... / ...

## **PSE: Pôle Santé Environnement - Direction Santé**

**PSE-SANTE:** Thématique 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

**BMCA:** Bureau de modélisation des transferts dans l'environnement pour l'étude des conséquences des accidents

**PSE-ENV:** Thématique Environnement, déchets et géosphère

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

**LMRE:** Laboratoire de métrologie de la radioactivité dans 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 / SEDRE:** Service des Déchets Radioactifs et des transferts dans la géosphère

**LETIS:** Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sous-sols

**LELI:** Laboratoire de recherche sur le devenir des pollutions de sites radioactifs

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

**PSE-ENV / SRTE:** Service de Recherche sur les Transferts et les Effets des radionucléides sur les écosystèmes

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

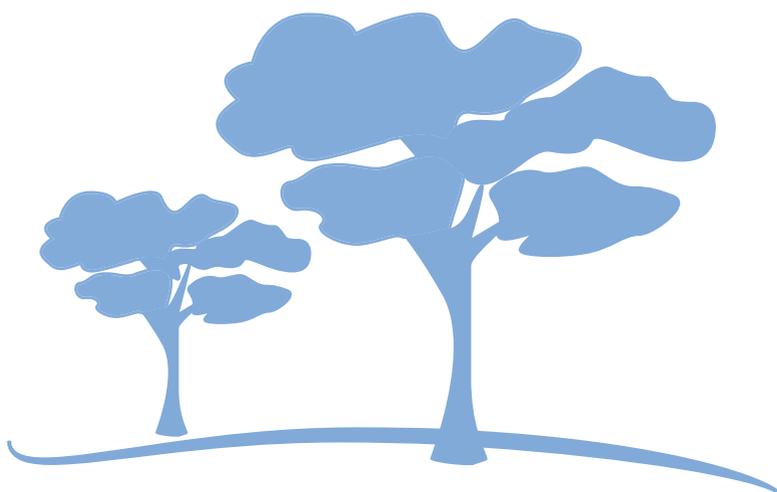
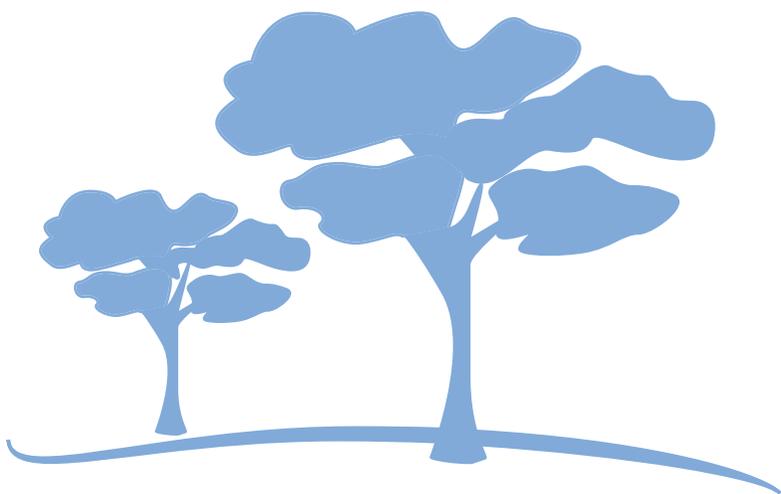
**LR2T:** Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes terrestres

**LRC:** Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville

**LRTA:** Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques

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

Réalisation du livret 2022: Sandrine Marano [IRSN] et 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 2021-00059

**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)

