



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# LIVRET DES THÈSES 2021

30 mars - 1<sup>er</sup> avril

**Journées  
des thèses  
2021**

100 % Digital

MEMBRE DE

**ETSON**



# JOURNÉES DES THÈSES 2021

» » » 30 mars - 1<sup>er</sup> avril

## PROGRAMME



## ► Mardi 30 mars

09h15 - 12h00

### Sessions réservées aux doctorants

L'auditorium

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

- Introduction : Jean Christophe Niel, Directeur Général
- « Place de votre projet dans la recherche à l'IRSN »
- « Vous avez dit ouverture à la société ? »
- La formation à l'IRSN

La Grande Motte

#### ► Atelier pour les doctorants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> année

- Table ronde : « La science ouverte »
- Activité de speed-networking

13h00 ► Ouverture des Journées des thèses par le Directeur Général

13h30 - 15h00 SESSIONS PARALLÈLES

L'auditorium

#### ► Risques associés aux rayonnements ionisants dans le domaine médical : de la perception à la prédiction

**Kossi Dovéné ABALO** - Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition aux rayonnements ionisants lors de procédures de cardiologie interventionnelle en pédiatrie, au sein de la cohorte COCCINELLE.

**Anais 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 ».

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

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

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

La Grande Motte

#### ► Compréhension et modélisation des accidents en réacteur

**Juliana GARCIA SARMIENTO** - Caractérisation des coulées de magma à travers des débris lors d'un transitoire accidentel.

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

**Gabriela SENRA PESSAHNA RIOS NOBREGA** - Étude de l'empoisonnement des recombineurs.

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

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

15h - 15h20 ► Pause

15h20 - 16h20 **SESSION POSTER**

16h30 - 17h45 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

► **Impact sur les écosystèmes des rayonnements ionisants à faible dose**

Loïc QUEVAREC - Compréhension des mécanismes impliqués dans la réponse évolutive de populations de nématodes (*Caenorhabditis elegans*) exposées à des rayonnements ionisants.

Elizabeth DUFOURCQ-SEKATCHEFF - La radiosensibilité des gamètes chez *Caenorhabditis elegans* : un élément déterminant de la reprotoxicité radioinduite ?

Noémie - Évaluation des effets reprotoxiques et de leur transmission à la descendance chez le poisson modèle *Danio rerio* après irradiation gamma chronique.

La Grande Motte

► **Développement de schémas numériques pour la modélisation des phénomènes associés à des accidents**

Bassam GAMAL - Développement d'une approche par simulation des grandes échelles pour la déflagration.

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

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

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

► **Mercredi 31 mars**

09h00 - 10h15 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

► **Explorer les voies moléculaires et cellulaires pour comprendre les effets physiologiques résultant d'une exposition chimique ou radiologique**

Elsa CANTABELLA - Analyse des effets neurologiques des expositions chroniques aux rayonnements ionisants à faible dose : des réponses moléculaires aux effets neurologiques.

Léo MACE - Impact de l'inhalation de particules de tungstène sur le système nerveux central : étude de neurotoxicité et conséquences sur la neurogénèse olfactive chez le rat.

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

Ségolène LADAIGUE - Régulation des interactions entre les monocytes et les cellules endothéliales dans un contexte de radiothérapie.

## La Grande Motte

### ► Modélisation du comportement chémo- mécanique des milieux argileux et cimentaires

**Yara BARAKAT** - Impact of saline/alkaline plumes on the swelling and self-sealing behavior of a clay damages rock.

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

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

10h15 - 10h35 ► **Pause**

10h35 - 11h35 **SESSION POSTER**

11h40 - 13h00 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

### ► Impact environnemental d'un rejet radioactif accidentel

**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.

**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*.

**Dina OKHRIMCHUK** - Study of the long-term behaviour of <sup>137</sup>Cs atmospheric fallouts in French forests.

**Gauthier FONTAINE** - Analyse épistémologique des incertitudes liées à l'élaboration et l'usage de modèles dans le domaine de l'environnement.

## La Grande Motte

### ► Épuration - filtration des effluents gazeux radioactifs

**Hantao LIN** - Évaluation de la contribution du mécanisme d'échange isotopique à l'épuration de l'iode radioactif — Application aux tests de pièges à iode par une méthode non-radioactive.

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

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

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

14h00 - 15h15 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

### ► Aérocontamination dans les installations nucléaires

**Zeinab RIDA** - Mécanismes de transfert aéraulique au travers d'ouvertures d'enceintes de chantier : évaluation de la contribution du comportement aérodynamique des aérosols au phénomène de rétrodiffusion.

**Daniel HARDY** - Study of the processes of particle formation through the drying of droplets.

**Modou MBAYE** - Remise en suspension particulaire par impact de jet de liquide contaminé contre une surface.

**Delphine COSTA** - Validation des modèles de rétention de la pollution particulaire dans les équipements de réseau de ventilation.

## La Grande Motte

### › Évaluation du risque sismique

**Fiia-Charlotta NURMINEN** - Probabilistic fault displacement hazard analysis – Improved methodology and applications.

**Rihab SASSI** - Modélisation de la rupture spontanée sur des géométries de failles complexes pour étudier l'aléa rupture de surface et le mouvement du sol en champ proche .

**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.

15h 15 - 15h 35 › **Pause**

15h 40 - 17h 00 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

### › Développement de schémas de calcul et de schémas numériques pour l'évaluation de la sûreté et des installations nucléaires

**Romain VUIART** - Mise au point d'un schéma de calcul pour la quantification de la fluence neutronique vue par la cuve au cours du fonctionnement d'un réacteur de puissance à eau pressurisée.

**Kévin FRÖHLICHER** - Modélisation hybride Déterministe / Monte Carlo pour l'optimisation de calculs de transitoires de puissance en cinétique espace-temps.

**Robert CAULK** - Modeling the transience of partial saturation and cracks in heterogeneous swelling clays using the Discrete Element and Finite Volume methods.

**Abdellah AMRI** - Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs.

## La Grande Motte

### › Comportement de l'acier

**Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU** - Étude de la production d'hydrogène moléculaire par la corrosion anoxique des aciers sous irradiation gamma.

**Arnaud ALLERA** - Modélisation multi-échelles de la plasticité dans les aciers fer-carbone.

**Aya RIMA** - Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil des installations nucléaires françaises.

17h 00 - 17h 15 › **Pause**

17h 20 - 18h 20 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

### › Transfert des radionucléides dans l'environnement

**Adrien DELAVAL** - Modélisation du Transfert des Radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer.

**Sarah ZAMANE** - Validité temporelle des paramètres de rétention des radionucléides dans les sols.



## La Grande Motte

### › Mobilisation de la classification des connaissances pour l'évaluation des risques

Nicolas DECHY - Des leçons à apprendre des accidents à l'utilisation d'une nouvelle connaissance et culture des accidents.

Hugues DELATTRE - Vents extrêmes et exceptionnels - Caractérisation, Modélisation et Projection future.

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

18 h 30 › **After-work** uniquement pour les doctorants. Soirée jeux et Apéro , organisée par l'ADIN

## › Jeudi 1<sup>er</sup> avril

09h00 - 10h15 **SESSIONS PARALLÈLES**

L'auditorium

### › Développement de contremesures médicales adaptées aux effets secondaires de la radiothérapie et aux conséquences des situations accidentelles

Clément BROSSARD - Traitement par thérapie cellulaire des effets secondaires des radiothérapies sur la vessie.

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.

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.

## La Grande Motte

### › Mise en œuvre de dispositifs de mesures et de démarches méthodologiques pour caractériser les radionucléides dans l'environnement

Nathan BODEREAU - Sources et comportement du <sup>14</sup>C dans un fleuve nucléarisé (Rhône).

Pierre LEFEBVRE - Évolution à long terme de la spéciation et de la mobilité de l'uranium dans les sédiments lacustres.

Anaëlle MAGRE - Détermination du rapport isotopique <sup>135</sup>Cs/<sup>137</sup>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.

10h15 - 10h35 › **Pause**

10 h 35 - 11 h 35 **SESSION POSTER**

## 11 h40 - 13h00 SESSIONS PARALLÈLES

### L'auditorium

#### ► Développement de procédés de mesures

Mélody PALLU - Études des doses pour le personnel navigant de l'aviation civile liées aux flashes gamma terrestres et autres phénomènes électriques atmosphériques.

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.

Ayedah TARIQ - Développement de capteurs à fibre optique dédiés à la mesure *in situ* du pH de bétons.

Marine BOUDIAS - Développement de supports hautement sélectifs pour l'étude de la migration des contaminants radioactifs ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) dans l'environnement.

### La Grande Motte

#### ► Compréhension et modélisation des accidents en réacteur

Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN - Étude du comportement au fluage des gaines en alliage de zirconium pré-oxydées sous sollicitations thermomécaniques simulant un accident de perte de réfrigérant primaire.

Jean MULLER - Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide.

Jimmy MARTIN - Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation gravitaire dans un bassin.

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

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

#### 13 h 10 - 13h30 ► Discours de clôture - Remise du prix poster

## SESSIONS POSTERS & AUTRES INFORMATIONS

### SESSIONS POSTERS

- › Sessions les Mardi 30 mars 15 h 20 - 16 h 20
- Mercredi 31 mars 10 h 35 - 11 h 35
- Jeudi 1<sup>er</sup> avril 10 h 35 - 11 h 35

### PÔLE SANTÉ ENVIRONNEMENT

- › Unité de recherche - Environnement Pages 109 - 118
- › Unité de recherche - Santé Pages 119 - 131

**PÔLE DÉFENSE SÉCURITÉ ET NON PROLIFÉRATION** Page 134

**PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE** Pages 135 - 146

### AUTRES INFORMATIONS

- › Soirée de l'ADI[N] Page 85
- › Du chercheur à l'inventeur Page 147
- › Publications des doctorants de l'IRSN Pages 148 - 149
- › Présentation de l'ADI[N] Pages 150 - 151
- › Présentation de l'ASTHEC Pages 152 - 153
- › L'information scientifique et technique Pages 154 - 157

**INDEX DES PRÉSENTATIONS** Pages 158-160

### LISTE DES SERVICES

**ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS** Pages 161-162



## ➤ Mardi 30 mars

09 h 15 - 12 h 00

L'auditorium ➤ ACCUEIL DES DOCTORANTS DE 1<sup>RE</sup> ANNÉE  
La Grande Motte ➤ ATELIER POUR LES DOCTORANTS DE 2<sup>E</sup> ET 3<sup>E</sup> ANNÉE

13 h 00 L'auditorium

➤ OUVERTURE DES JOURNÉES DES THÈSES PAR LE DIRECTEUR GÉNÉRAL

13 h 30 - 15 h 00 L'auditorium

SESSION PARALLÈLE

➤ RISQUES ASSOCIÉS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS DANS LE DOMAINE MÉDICAL :  
DE LA PERCEPTION À LA PRÉDICTION

**Président : Jean-Michel BONNET**  
Directeur de la Santé

**Kossi Dovéné ABALO** - Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition aux rayonnements ionisants lors de procédures de cardiologie interventionnelle en pédiatrie, au sein de la cohorte COCCINELLE.

**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 ».

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

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

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

## SUJET DE LA THÈSE

### Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition aux rayonnements ionisants lors de procédures de cardiologie interventionnelle en pédiatrie au sein de la cohorte COCCINELLE

Doctorant :	Kossi Dovéné ABALO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Université Paris-Saclay / École Doctorale de Santé Publique
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Estelle RAGE - de MOISSY
Directeur de thèse :	Marie-Odile BERNIER - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

---

L'utilisation des procédures de cardiologie interventionnelle (PCI) en pédiatrie a permis des progrès incontestables dans la prise en charge des cardiopathies congénitales. Cependant le risque sanitaire associé à une exposition aux rayonnements ionisants (RI) pendant l'enfance demeure une question majeure en radioprotection, notamment en raison de la plus grande sensibilité des enfants aux RI.

La cohorte COCCINELLE a été mise en place pour évaluer le risque de cancer associé à l'exposition aux RI lors des PCI réalisées pendant de l'enfance. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse pour lequel trois axes de recherche ont été définis :

- Axe 1 : Une revue systématique et méta-analyse à partir des données de la littérature,
- Axe 2 : Une analyse descriptive de la cohorte et une analyse d'incidence des cancers,
- Axe 3 : Une analyse de la relation dose-réponse.

Au total, 17 104 enfants ayant reçu au moins une PCI avant l'âge de 15 ans entre 2000 et 2013 ont été inclus dans la cohorte, suivis en moyenne pendant 6,5 ans et ayant reçu un total de 22 227 PCI. Cinquante-neuf cas de cancer ont été observés. En comparant l'incidence des cancers observés dans la cohorte avec celle de la population générale (méthode des Ratios d'Incidence Standardisée (SIR)), on observait une augmentation significative de l'incidence pour l'ensemble des cancers (SIR=3,8 [intervalle de confiance à 95% 2,9-4,9]), les leucémies (N=15, SIR=3,3 [2,0-5,4]), les lymphomes (N=23, SIR=14,9 [9,9-22,5]) et les cancers solides à l'exclusion des tumeurs du système nerveux central (N=15, SIR=3,3 [2,0-5,5]). Ces résultats - objet du deuxième axe de thèse - seront consolidés avec l'analyse de la relation dose-réponse et la prise en compte des facteurs de prédisposition au cancer dans le 3<sup>ème</sup> axe de thèse pour lequel la reconstitution des doses reçues par les participants de l'étude est actuellement en cours. Les résultats de la méta-analyse, premier axe de thèse, ont montré que l'exposition médicale diagnostique pendant l'enfance à des doses faibles à modérées de RI (notamment la scannographie), d'après la littérature, pourrait conduire à une augmentation du risque de leucémie et de tumeurs cérébrales.

L'étude COCCINELLE utilise les données médico-administratives dont la plupart sont fournies par les hôpitaux. La crise sanitaire a entraîné un gel partiel de la collaboration avec les hôpitaux participant à l'étude, ce qui a entraîné un retard dans la collecte des données pour reconstituer les doses.

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 »

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

Depuis plusieurs décennies, les évolutions technologiques favorisent la multiplication des actes diagnostiques utilisant les rayonnements ionisants (RI). La dose délivrée au cours des examens scanners, comprise entre 5 et 50 mGy selon les organes exposés<sup>1</sup>, est nettement plus élevée que celle délivrée en radiologie conventionnelle. De plus, il a été montré que les enfants présentaient une radiosensibilité accrue pour 25% des cancers<sup>2</sup>.

Dans ce contexte, le laboratoire d'épidémiologie des RI de l'IRSN a mis en place la cohorte « Enfant Scanner » en 2009. Sont inclus dans cette étude les patients qui ont été exposés à un scanner pour une pathologie non cancer avant l'âge de 10 ans et ce, entre 2000 et 2010 dans l'un des 21 CHU participant. Une première analyse, réalisée sur un échantillon de 67 000 enfants de la cohorte suivis jusqu'en 2011, a montré une augmentation de risque, non significative, de leucémie et de tumeur cérébrale associée à la dose cumulée. Cependant, le manque de puissance statistique de cette analyse pour la mise en évidence, si elles existent, d'augmentations significatives, limitait la portée des résultats.

Au cours de cette thèse, un premier travail a consisté à intégrer 50 000 enfants supplémentaires dans les analyses et à individualiser les cas de cancers incidents jusqu'au 31 décembre 2016 et jusqu'à l'âge de 18 ans à partir des données du Registre National des Cancers de l'Enfant (RNCE). Désormais, le suivi est de 9,5 ans en moyenne. Des ratios de risques instantanés ont été estimés à l'aide de modèles de Cox, ajustés sur le sexe et l'exposition cumulée à l'organe. 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.

Le croisement avec la Cohorte Cancer de l'INCa permettra le suivi des patients à l'âge adulte. L'estimation des doses reçues dans les services de radiologie participant sera complétée à partir du Système National des Données de Santé (SNDS) pour prendre en compte les examens scanners réalisés en dehors des 21 CHU de l'étude. Enfin, nous évaluerons l'impact de la prise en compte de ces nouvelles doses, des incertitudes dosimétriques et des risques compétitifs sur l'estimation de la relation dose-réponse.

1. Mathews JD *et al.* Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 346 f2360, 2013.

2. UNSCEAR. Annex B: Effects of Radiation Exposure of Children. United Nations, 2013.

## SUJET DE LA THÈSE

### 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
École doctorale :	Université Paris-Saclay / PHENIICS
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SDOS / LEDI
Tuteur de thèse :	Estelle DAVESNE / Stéphanie LAMART
Directeur de thèse :	Aurélié DESBREE - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

---

Les traitements en radiothérapie interne reposent actuellement sur l'administration d'une quantité d'activité proportionnelle au poids du patient. Cependant, la biocinétique du radiopharmaceutique, spécifique à chaque patient peut entraîner un sous-dosage de la quantité de radioactivité nécessaire à l'élimination des lésions ou à un surdosage pouvant induire une toxicité. L'optimisation des traitements nécessite l'estimation des doses personnalisées évaluée à partir d'une biocinétique individuelle. De nouveaux protocoles basés sur l'analyse d'images sont en cours de développement, afin d'évaluer la biocinétique et la dose personnalisée. Cependant, l'estimation de la dose à partir des images est sujette à une incertitude jugée comme importante mais généralement ignorée.

Cette thèse vise (i) à développer des méthodes permettant d'estimer au mieux la dose personnalisée à partir des images du patient et (ii) à évaluer les incertitudes associées à ces méthodes dosimétriques, afin d'optimiser les protocoles de suivi en réduisant les incertitudes à un niveau jugé acceptable.

Pour quantifier la biocinétique du patient deux fonctionnalités basées sur l'analyse d'images scintigraphiques du patient ont été intégrées dans le logiciel IRSN OEDIPE: (1) pour une série d'images 3D ou (2) pour une série d'images 2D et 3D. Des études dosimétriques sur des fantômes ont permis de valider ces développements. Par exemple, pour un fantôme JASZCZAK contenant de  $I^{131}$ , l'erreur relative sur la dose estimée par OEDIPE par rapport à la valeur théorique est inférieure à 25% pour une série d'image 3D et à 15% pour une série d'image 2D et 3D. Les erreurs relatives obtenues par OEDIPE pour une série d'images 3D sont similaires à celles obtenues par le logiciel commercial PLANET® Onco.

L'évaluation des incertitudes par l'utilisation d'un réseau bayésien a été initiée. Cette méthode statistique a été choisie grâce à sa souplesse, sa lisibilité et sa rapidité. Une première version du réseau bayésien a été développée en identifiant les grandeurs impliquées dans l'évaluation de la dose personnalisée à partir des images du patient ainsi que leurs relations. Ce réseau comporte quatre parties pour propager les incertitudes relatives au calcul de dose, à l'estimation du volume, à la biocinétique, au traitement des images. La consultation d'experts a permis de valider la structure du réseau en relation avec les pratiques cliniques.

Des distributions de probabilité seront attribuées aux différents paramètres sources d'incertitudes, afin d'estimer les incertitudes sur la dose. Les résultats obtenus avec le réseau seront comparés avec ceux obtenus par d'autres techniques disponibles dans la littérature.



## SUJET DE LA THÈSE

### Caractérisation de microfaisceaux d'ions et R&D sur l'installation MIRCOCM

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

L'un des axes de recherche de l'IRSN est d'approfondir les connaissances sur la genèse des effets biologiques suite à une irradiation et en particulier sur les effets secondaires dus à des traitements par radiothérapie. Dans cette optique, l'installation MIRCOCM fut construite fin 2018. Accueillant une ligne de microfaisceau d'ions pouvant irradier des échantillons biologiques vivants, elle a notamment pour objectifs de permettre d'identifier et de prévenir les effets secondaires des radiothérapies et de faire le lien entre les grandeurs physiques macroscopiques et les phénomènes biologiques tissulaires, cellulaires, voire subcellulaires.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte et pose les problématiques suivantes :

- Comment et quels outils utiliser pour établir la relation dose-effet aux faibles doses ?
- Comment lier des grandeurs physiques macroscopiques à des effets biologiques microscopiques, *in-vitro* et *in-vivo*, aux échelles cellulaires et multicellulaires ?

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

- Le premier consistera à modéliser l'intégralité de la ligne avec le code de calcul Monte-Carlo GEANT4. Cette modélisation permettra de simuler les différentes irradiations effectuées sur MIRCOCM et deviendra à terme un outil de référence pour les radiobiologistes.
- Le deuxième consistera à étendre l'éventail des ions disponibles pour effectuer des expérimentations plus diversifiées. Actuellement, la ligne permet de délivrer des faisceaux de proton et de particules  $\alpha$ . Une étude sera menée sur les capacités de la ligne à délivrer des faisceaux d'ions de type bore, carbone ou oxygène.
- Enfin, cette thèse est au cœur d'une collaboration avec le CINaM, Centre interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille, qui développe un détecteur de résolution spatiale sub-micrométrique qui permettra de mesurer la géométrie du microfaisceau à l'air.

Durant la première année, plusieurs résultats ont été obtenus :

- Premièrement sur la caractérisation des faisceaux d'ions  $H^+$ , avec l'étude de plusieurs paramètres comme l'intensité et la stabilité du faisceau, le diamètre d'impact sur cible, et la précision du tir. Ces résultats ont permis de rédiger une publication.
- Ensuite, la caractérisation du système de détection en amont du porte-échantillon utilisant des fenêtres d'extraction en  $Si_3N_4$  avec des dépôts de Csl associées à un Channeltron avec des ions  $He^{2+}$ .
- Enfin, 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 en mettant en place des protections lumineuses et de détecter le microfaisceau d'ions  $H^+$ .

Les difficultés rencontrées découlent essentiellement du contexte sanitaire, notamment au premier confinement.

## SUJET DE LA THÈSE

### Activité humaine & performance transversale - Le cas de la préparation des traitements en radiothérapie externe

Doctorant :	Alexandra WARTEL
Date du début de la thèse :	14/09/2019
École doctorale :	Université de Bordeaux / Sociétés, Politique, Santé Publique
Laboratoire d'accueil :	PSN-EXP / SHOT / LSHS
Tuteur de thèse :	Céline PORET
Directeur de thèse :	Johann PETIT – Université de Bordeaux / Laboratoire IMS
Financement de thèse :	IRSN

---

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

Le processus de préparation du traitement des patients en radiothérapie externe constitue une organisation de ce type, car les activités sont réalisées par différents professionnels et à des moments différents, et l'objectif de sécurité des patients doit être maintenu malgré cette distribution. Ce projet de thèse est né du constat de « manques de fluidité » de ce processus par l'IRSN et l'ASN, pouvant impacter les conditions de réalisation du travail des professionnels et la sécurité des patients. L'objectif principal de cette thèse consiste à comprendre ces « manques de fluidité » au prisme des activités individuelles et collectives, et de leur inscription dans des organisations transversales ayant tendance à fragmenter l'activité.

La première phase exploratoire de cette recherche, a consisté à définir les contours de ce processus de préparation, et les « manques de fluidité » associés. La deuxième phase qui s'engage consistera à recueillir des données précises auprès de deux centres de radiothérapie. Ce recueil sera décomposé en deux moments, un moment exploratoire volontairement très ouvert, permettant l'émergence des questionnements et problématiques du terrain, jusqu'à un moment plus ciblé.

Les premiers résultats, issus de la phase exploratoire, mettent en évidence que les contours du processus de préparation sont difficiles à définir : aucun consensus n'existe sur le moment où il commence et sur celui où il se termine. La manière de définir la préparation comme un seul processus est probablement en cause. Il existe en effet différents types de préparation ayant à voir avec le type de traitement à réaliser (classique, urgence, ré-irradiation, hypo-fractionnement) et l'objet de la préparation (préparation du dossier médical, du dossier technique, du patient). Un autre résultat montre que les manques de fluidité consisteraient en des discontinuités : accélérations, des ralentissements voire arrêts du processus de soin, résultant de la « complexité » de cette activité de préparation. Les prochains résultats devraient permettre de préciser cette « complexité » et d'identifier si les discontinuités sont purement négatives ou également positives (temps nécessaire à la coordination, à la construction de la sécurité des patients etc).

➤ Mardi 30 mars

13 h 30 - 15 h 00 La Grande Motte

#### SESSION PARALLÈLE

##### ➤ COMPRÉHENSION ET MODÉLISATION DES ACCIDENTS EN RÉACTEUR

**Président: Patrice GIORDANO**

Directeur de la Recherche en Sûreté

**Juliana GARCIA SARMIENTO** - Caractérisation des coulées de magma à travers des débris lors d'un transitoire accidentel.

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

**Gabriela SENRA PESSAHNA RIOS NOBREGA** - Étude de l'empoisonnement des recombineurs.

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

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

SUJET DE LA THÈSE

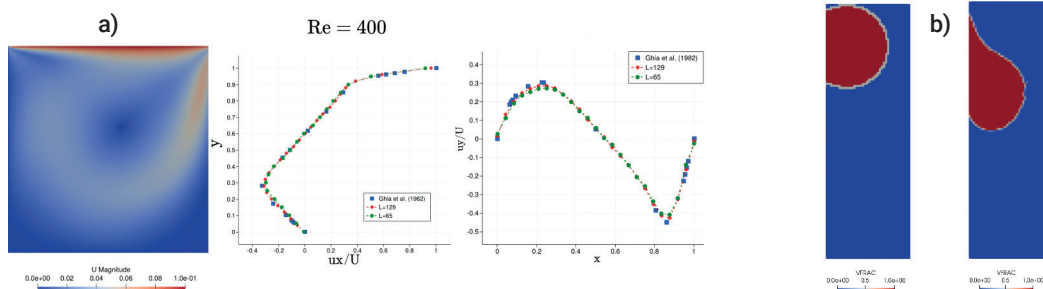
Caractérisation des coulées de magma à travers des débris lors d'un transitoire accidentel

Doctorant : Juliana GARCIA SARMIENTO  
 Date du début de la thèse : 15/07/2019  
 École doctorale : Aix-Marseille Université /  
 Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique  
 Laboratoire d'accueil : PSN-RES/SAM/LEPC  
 Tuteur de thèse : Vincent TOPIN / Florian FICHOT  
 Directeur de thèse : Pierre SAGAUT - M2P2  
 Financement de thèse : IRSN

Dans un réacteur nucléaire, le terme accident grave est employé dès lors que les crayons de combustible commencent à fondre. Un moyen de ralentir ou de stopper la progression de l'accident à ce stade est de réinjecter de l'eau pour refroidir le cœur dégradé (renoyage). Cependant, du fait de l'écart important entre la température de l'eau injectée et celle du cœur, le renoyage peut provoquer l'effondrement des gaines des crayons de combustible déjà fragilisées, et être à l'origine de la formation de lits de débris. Ces derniers sont constitués de fragments de gaines et de pastilles de combustible et présentent une structure poreuse potentiellement difficile à refroidir. Ainsi, lorsque le refroidissement n'est pas suffisant pour évacuer la puissance résiduelle qu'ils génèrent, les débris fondent en modifiant la porosité du lit et en rendant encore plus difficile le refroidissement.

L'objectif de ce travail de thèse est de caractériser l'évolution des propriétés structurales des lits de débris en présence de coulées de corium (mélange des différents matériaux fondus: combustible, gainage, acier). Des travaux précédents à l'IRSN ont déjà permis, à l'aide d'une méthode granulaire, d'évaluer plusieurs paramètres (porosité, surface spécifique, perméabilité...) influant sur la refroidissabilité des lits de débris ainsi formés. Dans le but de modéliser le mélange progressif de corium et de débris lors du transitoire, le travail consiste en un premier temps à développer un outil basé sur une méthode de type Lattice Boltzmann (LBM) permettant de gérer à la fois la relocalisation de matière fondue dans un lit de débris et les échanges de chaleur entre les deux phases solide et liquide. Il s'agira ensuite d'étudier, à l'aide de cet outil et sur la base de plusieurs lits caractéristiques, l'influence de coulées progressives de corium dans les lits de débris sur l'évolution de leur microstructure. A terme, les résultats de ces travaux permettront d'améliorer les modèles dédiés aux lits de débris dans le logiciel d'accident grave ASTEC développé par l'IRSN.

Lors de cette première partie de la thèse, nous avons fait le choix de d'une méthode LBM dite de « surface libre » (correspondant à une méthode VOF adaptée à la LBM) pour simuler les écoulements multiphasiques liquide (corium) / gaz (air ou vapeur). La particularité de cette méthode est que la densité et la vitesse de la phase gaz ne sont pas résolues et le comportement à l'interface entre la phase liquide et la phase gaz est gérée par des conditions aux limites. De ce fait, il existe principalement trois types de cellules : liquide, interface et gaz, mais seules les deux premiers types sont calculés. Une première version en 2D du modèle a été développée. Les premiers tests de simulation numérique, comportent des cas monophasiques (liquide saturé) : une cavité entraînée, l'écoulement dans un canal avec élargissement brusque, un écoulement de poiseuille ; et pour les cas bi-fluides une « rupture de barrage » (*Dam Break*), la chute d'une goutte dans un canal ou encore l'écoulement d'une goutte sur un plan incliné. La comparaison avec la théorie donne dans l'ensemble de bons résultats quantitatifs et qualitatifs (cf Figure). La suite de ce travail de thèse consistera à coupler cette première version du code avec un modèle thermique volumes finis disponible dans le code de calcul CALIFS. L'objectif de ce couplage sera, via l'introduction dans le modèle LBM d'une viscosité variable dépendante de la température, de simuler les processus de fusion et solidification du corium.



## 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**

Doctorant :	Laura WARTSKI
Date du début de la thèse :	01/12/2019
École doctorale :	EMSTU Orléans & Nagaoka University of Technology
Laboratoires d'accueil :	PSN-RES/SAM/BEAM ICARE/CNRS Orléans & Nagaoka University of Technology (Japon)
Tuteur de thèse :	Ahmed BENTAIB
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX, ICARE
Co-directeur :	Satoshi Kadowaki - Nagaoka University of Technology
Financement de thèse :	IRSN/Région Centre Val de Loire

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 de 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 en vue de définir la matrice des essais et d'élaborer les protocoles expérimentaux nécessaires pour réaliser ces essais. Les circonstances dues au Covid19 et à un arrêt maladie de longue durée, ne m'ont pas permis de finaliser ces travaux. Aussi, la suite de la thèse se déroulera comme suit :

- La deuxième année sera consacrée à la finalisation de l'étude bibliographique et à la détermination des limites d'inflammabilité et des vitesses de flammes dans mélanges composés  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ , et  $CO_2$  en tenant compte de l'impact de la température et de la pression ainsi que celui de l'oxygène. Pour ce faire, les bombes sphériques de 56 et 93 litres seront utilisées,
- La troisième année sera dédiée à 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. A cet effet, l'installation ENACCEF-2 sera utilisée.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude de l'empoisonnement des recombineurs

---

Doctorant :	Gabriela SENRA PESSAHNA RIOS NOBREGA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Université d'Orléans / Énergie - matériaux - sciences de la terre et de l'univers
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SAM / BEAM
Tuteur de thèse :	Ludovic MAAS
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX - CNRS
Co-directeur :	Ernst-Arndt REINECKE - FZ - Jülich
Financement de thèse :	IRSN / FZ - Jülich

---

During a severe accident in a nuclear power plant, a large amount of hydrogen can be produced in the reactor core degradation phase and during molten core concrete interaction (MCCI). As highlighted by the Fukushima Daïchi accident, the dynamic pressure loads resulting from hydrogen combustion may threaten safety-relevant systems and the reactor containment, which is the last barrier to prevent radioactive releases to the environment. For hydrogen risk mitigation, French nuclear power plants are equipped with passive autocatalytic recombiners (PARs). These devices remove hydrogen from the containment by an exothermic reaction between hydrogen and oxygen on catalytic surfaces. However, PARs can be exposed, in normal operation and accidental conditions, to different airborne substances or atmospheric pollutants that may lead to catalyst deactivation. Catalyst poisoning is a safety concern since it can result in start-up delay and in loss of the recombination efficiency, increasing the hydrogen explosion risk.

This PhD thesis, combining experimental and numerical work, aims to expand the knowledge concerning PARs deactivation in normal and accidental conditions. The objective is to investigate with the REKO platform at Jülich (Germany) the effect of potential poisoning products on hydrogen recombination, and to enhance the models implemented in the SPARK code, developed at IRSN for detailed PARs' modeling. The first year of thesis was dedicated to a bibliographic analysis, in order to define the matrix of tests to be performed during the second year, and a deep understanding of the SPARK code. The third year will be devoted to experiments analysis and models enhancements.

A first experimental campaign, performed on the REKO-Fire facility, focused on the effect of cable fire products on different catalysts (palladium, platinum and combination of both) under three fire regimes (well-ventilated, under-ventilated and oxidative pyrolysis). Catalyst deactivation was observed for the platinum catalyst in the under-ventilated regime, while the palladium catalyst operated normally. During oxidative pyrolysis tests, start-up delay was observed for all catalyst types, probably due to the physical barrier formed by the products. The next experimental campaigns will focus on two other issues: carbon monoxide (produced in case of fire inside the containment, and also during MCCI) and oil (which can be projected by primary pumps in normal operation and form an oily mist inside the containment). Catalyst poisoning by iodine will be addressed from a theoretical side due to the prohibitive chemical complexity of the experiments.

SUJET DE LA THÈSE

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

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

This research work is part of the periodic review of the 900 MWe reactors in France, within the framework of the theme related to the source term determination under accident conditions and more specifically with regard to the evaluation of fission products, such as iodine, having significant radiological consequences in short and medium term. Fission products may be released from the fuel and transported in the reactor primary circuit. During this transport, they can interact with each other but also with the structural materials (control rods, core internals, etc...) and thus present themselves as different chemical species when they arrive in the containment.

During an accident, the Ag-In-Cd control rods and the Zircaloy guide tubes are exposed to high temperatures, resulting in the formation and vaporization of Ag-In-Zr-O mixtures. The thermodynamic study of the Ag-In-Zr-O quaternary system is a necessary step for a reliable estimate of the vaporization of silver known to strongly interact with iodine. Ag-In and Ag-Zr binary subsystems have been investigated thoroughly whereas 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 20 to 80% at. Zr were prepared in a glove box, annealed at 600°C, 800°C and 1000°C and finally quenched. They were then analyzed by X-ray diffraction and SEM/EDS to identify the phases and measure their compositions.

For Zr rich samples,  $\text{InZr}_3$  and  $\beta\text{Zr}$  phases were identified in agreement with data reported by Betterton et al. For In rich samples, In and  $\text{In}_2\text{Zr}$  phases were found instead of  $\text{In}_3\text{Zr}$ , expected to be stable at the annealing temperature. Rietveld analysis confirmed the  $\text{In}_3\text{Zr}$  absence. This apparent inconsistency could be attributed to the fact that  $\text{In}_3\text{Zr}$  would only be stable below 600°C. Oxygen content measurements for equiatomic compositions indicate that equiatomic compounds are much more sensitive to oxygen.

In the future, electron Probe Micro Analyses will be performed to get more accurate phase compositions, the invariant temperatures in the In-Zr system will be determined using DTA. The standard formation enthalpies of the different stoichiometric compounds will also be determined using dissolution and direct reaction calorimetry measurements. 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.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Elouan LE FESSANT
Date du début de la thèse :	07/10/1019
École doctorale :	Université de Lille / Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Tuteur de thèse :	Anne-Cécile GREGOIRE
Directeur de thèse :	Jean-François PAUL - UCCS
Co-directrice :	Anne-Sophie MAMEDE - UCCS
Financement de thèse :	IRSN / OCDE (Projet ESTER)

Au cours d'un accident grave dans un réacteur nucléaire de nombreux produits de fission ainsi que des éléments constitutifs des barres de contrôle peuvent être relâchés et déposés dans le circuit primaire. Lors de l'accident de Fukushima Daiichi, des divergences entre les rejets mesurés à proximité du site et les codes de calcul ont été constatées à long terme (à partir de 5 jours après les premiers relâchements), illustrées par les rejets en iode et césium<sup>1</sup>. Ces divergences peuvent en partie être attribuées à la revaporisation de certains produits de fission déposés préalablement dans le circuit primaire.

Des études préliminaires à l'IRSN ont été menées sur les origines possibles de cette remobilisation dans le cadre du projet MiRE. Dorel OBADA (thèse 2014-2017<sup>2</sup>) a notamment étudié la remobilisation de dépôts d'aérosols d'iodure de césium (Csl) en présence d'un mélange air/vapeur d'eau et en rampe de température (250-750°C). Ses premiers résultats ont notamment montré un possible relâchement de l'iode sous forme moléculaire (I<sub>2</sub>).

Mon travail vise dans un premier temps à améliorer la représentativité de ces expérimentations vis à vis d'un accident grave. Pour cela l'influence d'une surchauffe de l'atmosphère (jusqu'à 1550°C) en amont des échantillons (dépôts d'aérosols sur acier préoxydé) a été étudiée ainsi que des compositions variables de gaz porteur (air/H<sub>2</sub>O/H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>).

Les premiers résultats montrent une forte influence de la concentration en oxygène de l'atmosphère sur la production d'I<sub>2</sub> suite à la revaporisation de Csl. En effet, une concentration faible en O<sub>2</sub> (inférieure à 10<sup>-4</sup> atm) entraîne une revaporisation sous forme d'aérosol de Csl sans phénomène d'oxydation. Au delà, la revaporisation se fait majoritairement sous forme I<sub>2</sub> (allant jusqu'à 70% de l'iode revaporisée). Le fait de surchauffer l'atmosphère entraîne une augmentation de la concentration d'O<sub>2</sub> dans le gaz porteur suite au craquage de l'eau. La surchauffe contribue donc à l'augmentation de la quantité d'I<sub>2</sub> issue de la revaporisation du Csl.

Par la suite, l'effet du bore présent dans l'eau du circuit primaire (sous forme H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) sera étudié. Pour cela les mêmes expérimentations seront réalisées avec une atmosphère d'eau borée sur des dépôts de Csl et de Cdl<sub>2</sub> afin de qualifier et quantifier l'effet du bore sur leurs revaporisations.

Enfin, la remobilisation de dépôts de tellure (dont un des isotopes est précurseur d'iode par décroissance radioactive) ainsi que celle de dépôts mixte de Csl et de tellure sera considérée. L'objectif sera de caractériser et de quantifier les phénomènes impliqués afin de constituer une base de données expérimentale permettant le développement de modèles à intégrer dans les outils de calcul.

1. Cousin F. *et al*, NURETH-18, 2019, p. 1119-1132.

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



➤ Mardi 30 mars

15h20 - 16h20

SESSION POSTER

16h30 - 17h45 L'auditorium

SESSION PARALLÈLE

➤ **IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES DES RAYONNEMENTS IONISANTS À FAIBLE DOSE**

**Présidente : Sandrine ROCH-LEFEVRE**

Chargée de mission "Partenariat" - Direction de la stratégie

**Loïc QUEVAREC** - Compréhension des mécanismes impliqués dans la réponse évolutive de populations de nématodes (*Caenorhabditis elegans*) exposées à des rayonnements ionisants.

**Elizabeth DUFOURCQ-SEKATCHEFF** - La radiosensibilité des gamètes chez *Caenorhabditis elegans* : un élément déterminant de la reprotoxicité radioinduite ?

**Noémie GUIRANDY** - Évaluation des effets reprotoxiques et de leur transmission à la descendance chez le poisson modèle *Danio rerio* après irradiation gamma chronique.

## SUJET DE LA THÈSE

Compréhension des mécanismes impliqués dans la réponse évolutive de populations de nématodes (*Caenorhabditis elegans*) exposées à des rayonnements ionisants

Doctorant :	Loïc QUEVAREC
Date du début de la thèse :	01/10/2018
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Jean-Marc BONZOM
Directeur de thèse :	Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

Les pressions anthropiques sur les écosystèmes, comme les pollutions par des substances radioactives, peuvent mener à l'extinction de populations si leur réponse évolutive (adaptation génétique, acclimatation...) est insuffisante. Pour une meilleure évaluation des risques écologiques d'une contamination de l'environnement, il est donc important de quantifier les réponses évolutives de ces populations, et de comprendre les conséquences de ces changements évolutifs sur leur maintien à long terme.

L'objectif de ce projet est d'étudier expérimentalement les réponses évolutives de populations de nématodes, *Caenorhabditis elegans*, exposées à des rayonnements ionisants (RI) gamma. Cet organisme modèle a été choisi car il s'éleve facilement en laboratoire et son cycle de vie est relativement court.

Pendant environ 20 générations des populations de *C. elegans* ont été exposées à trois débits de dose (0 - 1,4 et 50 mGy.h<sup>-1</sup>). Plusieurs traits d'histoire de vie ont été mesurés à chaque génération: l'effectif de la population, la fréquence des mâles, le succès d'éclosion et la taille de ponte. Différents plans expérimentaux ont également été réalisés pour déterminer si les modifications des traits observés étaient dues ou non à une adaptation génétique des populations.

Après 20 générations, l'effectif des populations irradiées augmente significativement de 5,3 % à 1,4 mGy.h<sup>-1</sup> et diminue de 7,7 % à 50 mGy.h<sup>-1</sup> par rapport aux populations contrôles. De surcroît, une augmentation significative de la fréquence des mâles, de 12 % et 18 %, a été mesurée respectivement pour des débits de dose de 1,4 et 50 mGy.h<sup>-1</sup>. Enfin, une diminution significative de 6,6 % du succès d'éclosion et de 8,2 % de la taille de ponte précoce a été observée pour 50 mGy.h<sup>-1</sup>.

La modification du sex-ratio pourrait s'expliquer par une augmentation des anomalies sur le chromosome X et des modifications du mode de reproduction. A 50 mGy.h<sup>-1</sup>, la diminution du succès d'éclosion pourrait être due à un effet négatif des RI sur l'embryogénèse. Une atteinte de l'embryogénèse et/ou de la gamétogénèse pourrait expliquer la diminution de la taille de ponte précoce. Ces deux paramètres pourraient expliquer la diminution de l'effectif des populations irradiées.

Les populations seront séquencées au fil des générations pour estimer l'impact des RI à l'échelle du génome sur la diversité génétique (richesse haplotypique, hétérozygotie...). Par une approche QTL (Quantitative Trait Loci) le lien entre les phénotypes observés et une région génomique sera établi, permettant de mettre en évidence des gènes soumis à la sélection vis-à-vis d'une exposition aux RI.

## SUJET DE LA THÈSE

La radiosensibilité des gamètes chez *Caenorhabditis elegans* :  
un élément déterminant de la reprotoxicité radioinduite ?

---

Doctorant :	Elizabeth DUFOURCQ-SEKATCHEFF
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Montpellier 3 / Sciences Chimiques et Biologiques pour la Santé
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Sandrine FRELON
Directeur de thèse :	Simon GALAS - IBMM
Financement de thèse :	IRSN

---

Mieux comprendre les effets biologiques radioinduits chez différentes espèces constitue un enjeu majeur de l'évaluation du risque radioécologique. Chez de nombreux animaux, la capacité à se reproduire, essentielle pour le maintien d'une population, est un paramètre particulièrement radiosensible. En particulier, l'irradiation chronique du stade œuf au stade jeune adulte (JA) de *Caenorhabditis elegans*, un ver rond hermaphrodite du sol, a montré une diminution significative de sa taille de ponte, associée à des effets sur la lignée germinale (e.g. arrêt du cycle cellulaire), une diminution du nombre de spermatozoïdes et une dérégulation de certaines protéines et gènes impliqués dans la reproduction et le métabolisme des lipides (e.g. vitellogénines, transporteurs lipidiques impliqués dans la maturation des ovocytes).

Pour aller plus loin et élucider les mécanismes sous-jacents à cette reprotoxicité radioinduite, cette étude vise à déterminer quels stades de développement, précoce ou tardif, sont les plus radiosensibles vis-à-vis des paramètres de reproduction analysés. De plus, le lien entre la reproduction et le métabolisme des lipides étant connu dans la littérature, une attention particulière a été portée à la modulation des lipides dans nos conditions.

Les nématodes de la souche hermaphrodite N<sub>2</sub> ont été exposés de manière chronique à une source de <sup>137</sup>Cs à 50 mGy.h<sup>-1</sup> durant plusieurs périodes incluant trois stades de développement différents, à savoir l'embryogenèse, la gonadogenèse précédant la méiose et le développement complet. Les effets ont été analysés au stade L4-JA. La taille de ponte et le succès d'éclosion ont été mesurés pendant 8 jours après irradiation et une analyse lipidique a été réalisée pour caractériser la quantité de lipides neutres, polaires (HPTLC) et d'acides gras (après estérification, GCMS / FID).

Nos résultats montrent une réponse plus ou moins sévère sur les paramètres de reproduction en fonction du stade de développement irradié, et des réponses opposées sur les classes lipidiques analysées (neutre/polaires). Ceci suggère la mise en place de mécanismes de réponse différents en fonction des stades irradiés qui pourraient être dus aux différences de radiosensibilité de la lignée germinale et somatique des nématodes, induisant des réponses opposées contribuant à maintenir l'homéostasie lipidique. De plus, certains acides gras spécifiques à l'alimentation sont moins présents après irradiation du développement complet. Ceci permet d'émettre une nouvelle hypothèse d'effet de l'irradiation sur la nutrition (assimilation et/ou comportement d'alimentation) ou l'utilisation de ces acides gras, qui sera à confirmer par des tests ultérieurs pour affiner la compréhension des mécanismes.

## SUJET DE LA THÈSE

Évaluation des effets reprotoxiques et de leur transmission à la descendance  
chez le poisson modèle *Danio rerio* après irradiation gamma chronique

---

Doctorant :	Noémie GUIRANDY
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Olivier SIMON
Directeur de thèse :	Olivier SIMON-IRSN
Financement de thèse :	IRSN

---

L'irradiation gamma externe, à faible dose peut avoir des effets reprotoxiques chez les animaux aquatiques. Ces effets directs et ceux transmis à la descendance pourraient modifier la structure des populations à long terme. Peu d'études ont été réalisées sur les effets de l'irradiation de plusieurs générations chez les vertébrés aquatiques. Les objectifs de cette thèse concernent l'étude des performances de reproduction du poisson modèle *Danio rerio* et l'identification de marqueurs moléculaires des effets reprotoxiques après exposition multigénérationnelle (descendance irradiée en continu) et transgénérationnelle (descendance non irradiée : *recovery*).

Deux études à forte dose (50 mGy h<sup>-1</sup>) ont été réalisées afin d'observer des effets sur la reproduction, en irradiant des adultes puis leur descendance. Le succès reproducteur des adultes (F0) était de 100% pour les conditions témoins et irradiées. Cependant les F1 irradiés et *recovery* n'étaient pas viables après 120 heures post fertilisation (hpf), avec 100% de mortalité. Plusieurs hypothèses sont à prendre en compte pour expliquer les effets observés sur la descendance : (1) transmission d'effets épigénétiques (méthylation de l'ADN) ; (2) altération de l'ADN des gamètes (génotoxicité) ; (3) mauvaise constitution des réserves (défaut de protéolyse de la vitellogénine) ; (4) concentration en cortisol maternelle trop élevée et transmise à la descendance. Ces marqueurs restent à analyser. Une troisième expérimentation, concernant une étude multigénérationnelle a été réalisée. Initialement, 3 générations devaient être exposées, mais seulement la première génération a pu l'être entièrement à faibles doses (0.05 et 5 mGy h<sup>-1</sup>) dans l'installation MICADO'LAB. Les capacités de reproduction des F0, exposés pendant 30 jours n'ont pas été altérées. Les résultats de mortalité des F1 ne présentent pas d'effet aussi drastique que pour les expérimentations à 50 mGy.h<sup>-1</sup>.

L'objectif étant d'observer les effets transmis de l'adulte à la descendance, les analyses ont été suivies à l'échelle individuelle en suivant pour chaque génération la ponte associée à chaque couple. Afin d'observer les effets mécanistiques, des résultats moléculaires sont attendus avec notamment le séquençage du transcriptome (RNAseq) et des quantifications de vitellogénine et cortisol. La dernière année sera consacrée à l'analyse des résultats RNAseq et à l'obtention des concentrations en vitellogénine et cortisol. Les effets transgénérationnels ne pourront être observés en raison de l'arrêt de l'expérimentation avant la troisième génération.

➤ Mardi 30 mars

16 h 30 - 17 h 45 La Grande Motte

#### SESSION PARALLÈLE

➤ **DÉVELOPPEMENT DE SCHÉMAS NUMÉRIQUES POUR LA MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS À DES ACCIDENTS**

**Président: Jean-Claude LATCHÉ**

Chercheur en analyse numérique - PSN-RES/SA2I

**Bassam GAMAL** - Développement d'une approche par simulation des grandes échelles pour la déflagration.

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

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

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

## SUJET DE LA THÈSE

### Développement d'une approche par simulation des grandes échelles pour la déflagration

Doctorant :	Bassam GAMAL
Date du début de la thèse :	07/11/2018
École doctorale :	Centralesupelec / Science Mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SA2I/LIE
Tuteur de thèse :	Laura GASTALDO
Directeur de thèse :	Denis VEYNANTE - EM2C
Financement de thèse :	IRSN

---

L'explosion des gaz constitue une source d'accidents majeurs dans les installations industrielles classiques et nucléaires. Dans les installations nucléaires, ces explosions peuvent entraîner la perte de confinement des matières radioactives et leur rejet dans l'environnement. Afin de prévenir les conséquences, il est primordial de se doter d'outils de calcul capables de prédire de manière réaliste les charges en pression et en température générées par l'explosion de gaz.

Le logiciel CALIF<sup>3</sup>S-P<sup>2</sup>REMICS a été développé par l'IRSN dans ce but. Il permet de traiter les écoulements turbulents réactifs compressibles, tels que ceux rencontrés lors d'une explosion. La turbulence est modélisée selon des modèles statistiques (RANS) en un point. Le modèle de combustion, basé sur une approche de type level-set, est fermé par une corrélation de vitesse de flamme dépendant des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. La validation du logiciel a mis en évidence le caractère peu prédictif de cette approche et l'importance d'une modélisation précise de la turbulence pour la simulation des phénomènes d'intérêt.

L'objectif est, en s'appuyant sur la simulation aux grandes échelles (SGE), de développer et d'implanter dans CALIF<sup>3</sup>S-P<sup>2</sup>REMICS un modèle permettant de mieux appréhender les phénomènes en jeu.

La première étape de la thèse a été de développer un modèle SGE pour les écoulements non réactifs compressibles. Le système d'équations régissant l'écoulement est résolu à l'aide d'un schéma explicite en temps de type volumes finis à mailles décalées. Le schéma satisfait au niveau discret une identité d'énergie cinétique. Cette propriété garantit la stabilité du schéma.

La deuxième étape de la thèse a consisté dans le développement d'un modèle de combustion adapté à la SGE : le modèle de flamme épaissie. Cette approche épaissit artificiellement le front de flamme permettant ainsi une description fine du front. Un modèle d'efficacité est utilisé afin de simuler le plissement de sous-maille, perdu dans l'opération d'épaississement. Une formulation dynamique de la fonction d'efficacité a été choisie afin de pouvoir simuler la transition entre déflagration laminaire et turbulente.

Ces développements ont été implantés dans CALIF<sup>3</sup>S-P<sup>2</sup>REMICS et validés sur différents cas analytiques ainsi que sur un cas d'intérêt (flammes accélérées par des obstacles). L'effet d'échelle a été étudié sur deux configurations expérimentales à petite et à moyenne échelle. L'effet de l'encombrement (position des obstacles ou taux de blocage) sur la propagation du front de flamme a été étudié. Une comparaison avec les résultats obtenus avec l'approche RANS a permis de mettre en évidence l'apport de l'approche SGE.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Docteurant :	Aubin BRUNEL
Date du début de la thèse :	27 / 10 / 2019
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Mathématiques et Informatique de Marseille
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Jean-Claude LATCHÉ
Directeur de thèse :	Raphaèle HERBIN - CNRS
Financement de thèse :	IRSN

Dans les simulations effectuées pour les études de sûreté nucléaire, les écoulements sont décrits la plupart du temps par des équations dont celle de Navier-Stokes, constituées des bilans de masse et de quantité de mouvement, où les termes de convection sont dominants. C'est le cas, par exemple, pour la simulation des incendies dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement ou pour la modélisation des déflagrations turbulentes, phénomènes décrits par des logiciels basés sur la librairie de composants pour la mécanique des fluides CALIF3S, développée à l'IRSN.

L'objectif de la thèse est de développer un ou des opérateurs discrets de convection performants pour de tels écoulements dans des domaines complexes. La discrétisation de l'opérateur de convection de type volume finie doit être à la fois stable et précise sur des maillages généraux. En outre, l'approximation en espace utilisée dans CALIF3S est une discrétisation à mailles décalées : les inconnues scalaires sont associées au maillage primal alors que la vitesse est associée au maillage dual. Deux opérateurs de convection discrets sont donc mis en œuvre, celui sur maillage dual devant respecter des contraintes de cohérence avec l'opérateur primal.

Dans un premier temps, un opérateur de convection sur maillage dual de type MUSCL a été développé et implémenté dans CALIF3S. Cet opérateur est plus précis que l'opérateur standard du premier ordre. Il a de plus été montré théoriquement que cet opérateur est stable au travers d'une identité d'énergie cinétique, et des tests menés sur des cas académiques ont permis de le valider numériquement.

Une seconde étape a consisté à étudier théoriquement une discrétisation « équilibrée » du terme de force de l'équation de la quantité de mouvement, car la discrétisation standard entraîne un manque de précision. Cette discrétisation se base sur le fait que le terme de pression doit absorber intégralement la partie potentiel du terme de force. La stabilité et la consistance de cette discrétisation ont été démontrées, et les gains apportés par rapport à la discrétisation standard ont été vérifiés numériquement.

Une troisième étape consistera à étendre les travaux précédents à des discrétisations en trois dimensions comportant des mailles prismatiques et pyramidales, et en particulier les travaux sur l'opérateur de convection de type MUSCL. Ces types de cellules sont en effet assez couramment utilisés dans les maillages industriels pour traiter des géométries complexes.



*Simulation d'un écoulement en eau peu profonde derrière un cylindre*

SUJET DE LA THÈSE

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

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

L'explosion de vapeur peut survenir au cours d'un accident grave lors de la mise en contact du corium et de l'eau de refroidissement. Elle est une menace pour l'intégrité du confinement. Ce phénomène, analogue à une détonation, est dû au transfert de chaleur extrêmement rapide du combustible vers le réfrigérant par la fragmentation fine du combustible fondu au passage de l'onde de choc.

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

En parallèle à une bibliographie approfondie du phénomène, une analyse détaillée du comportement de l'actuel modèle a été faite. Les calculs de sensibilité ont permis de dégager les conclusions les plus importantes suivantes :

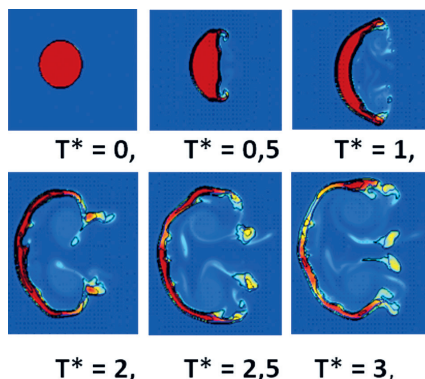
- L'évolution et la configuration locale des bulles générées par la vaporisation au cours de la fragmentation fine sont mal pris en compte par l'actuel modèle.
- Les cinétiques de fragmentation de goutte et de refroidissement de fragments ont un effet déterminant sur la cinétique d'amplification et sur 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.

Parmi les besoins, l'amélioration de la compréhension des processus de transfert de chaleur en cours de fragmentation est identifiée comme la mission prioritaire. Des simulations DNS couplée de la fragmentation et des transferts thermiques ont été initiées pour des situations sans ébullition.

- Les résultats attendus vont dans un premier temps permettre de proposer des ajustements des lois d'échanges et de spécifications physiques détaillées du modèle.
- Un autre intérêt de ces simulations est d'étudier l'impact solidification pour mieux comprendre et interpréter certaines expériences.

Dans ces simulations, la température est représentée par un champ scalaire se diffusant et n'impact pas les propriétés physiques des fluides, en particulier la densité. La prise en compte de la vaporisation sera donc sans doute délicate dans le contexte de la thèse.

Exemple de calcul préliminaire:  
champ de température  
d'une goutte liquide métallique  
et son environnement  
en cours de déformation.  
La couleur rouge indique une  
température supérieure à la  
température de solidification  
de la goutte





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
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Fabien DUVAL
Directeur de thèse :	Christophe FRIESS - M2P2
Co-Directeur :	Pierre SAGAUT - M2P2
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 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 du mélange gazeux.

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 CALIF3S développée à l'IRSN (dispersion, déflagration, incendie, transport de polluant,...). Il s'agit en particulier de poursuivre les développements menés pour les approches dites 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. Pour atteindre les objectifs fixés, la thèse s'articule autour de trois axes.

Le premier axe se concentre sur le développement d'une méthode de forçage volumique afin d'entretenir ou de générer une turbulence dans certaines zones de l'écoulement, typiquement les zones de transition RANS/LES. Le deuxième axe vise à améliorer les prédictions de la modélisation hybride en proche paroi en adoptant une approche de type pondération elliptique pour le modèle algébrique des tensions de sous-filtre. Enfin, l'approche hybride avec forçage sera étudiée sur un cas représentatif de fuite d'hydrogène dans un local ventilé. Il s'agira en particulier d'estimer les apports d'une approche hybride sur certaines configurations d'écoulement du programme expérimental CARDAMOMETTE mené à l'IRSN.

La méthode de forçage volumique développée au cours de la première année est basée sur une méthode de reconstruction des fluctuations. Ces fluctuations sont construites sur la base d'une superposition de modes de Fourier paramétrée sur des grandeurs statistiques cibles (énergie, échelle intégrale, ...). Dans le cas d'une turbulence homogène, la méthode s'apparente à un forçage linéaire des équations du mouvement pour la vitesse résolue. L'approche proposée a été testée et validée pour entretenir une turbulence homogène isotrope. Un contrôle dynamique permet de diriger rapidement l'énergie turbulente vers un niveau cible. Des développements sont en cours sur la mise en œuvre de cette méthode et sur le choix de certains paramètres des modes de Fourier (spectre d'énergie, fréquence caractéristique, ...) dans le cas d'un jet turbulent.



## ➤ Mercredi 31 mars

09 h 00 - 10 h 15 L'auditorium

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ EXPLORER LES VOIES MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES POUR COMPRENDRE LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES RÉSULTANT D'UNE EXPOSITION CHIMIQUE OU RADIOLOGIQUE

**Présidente: Laurence ROY**

Adjointe au Chef de service - PSE-SANTE / SESANE

**Elsa CANTABELLA** - Analyse des effets neurologiques des expositions chroniques aux rayonnements ionisants à faible dose : des réponses moléculaires aux effets neurologiques.

**Léo MACE** - Impact de l'inhalation de particules de tungstène sur le système nerveux central : étude de neurotoxicité et conséquences sur la neurogénèse olfactive chez le rat.

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

**Ségolène LADAIGUE** - Régulation des interactions entre les monocytes et les cellules endothéliales dans un contexte de radiothérapie.

## SUJET DE LA THÈSE

### Analyse des effets neurologiques des expositions chroniques aux rayonnements ionisants à faible dose : des réponses moléculaires aux effets neurologiques

Doctorant :	Elsa CANTABELLA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Olivier ARMANT
Directeur de thèse :	Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN
Co-directeur :	Thierry CHARLIER - IRSET
Financement de thèse :	IRSN

---

Les effets à long terme des expositions chroniques à faibles doses des rayonnements ionisants (RI) sur les écosystèmes font actuellement l'objet d'efforts de recherche significatifs. A l'échelle des populations sauvages, des études en situations post-accidentelles ont montré une diminution du volume crânien d'oiseaux (Tchernobyl) et de fœtus de macaques (Fukushima) dans les territoires contaminés. D'autre part, des études de laboratoire avec des rongeurs montrent qu'une exposition prénatale aux RI réduit le nombre de cellules sur plusieurs types cellulaires neuronaux, diminue la complexité du réseau dendritique et conduit à des perturbations du comportement. Une altération de l'intégrité du SNC lors d'une exposition chronique à faibles doses de RI est susceptible d'affecter des processus majeurs comme la survie, la reproduction et le comportement.

Mon projet a pour objectif d'acquérir des connaissances mécanistiques sur les effets des RI sur le cerveau en utilisant le poisson zèbre, organisme modèle en écotoxicologie. Il a la particularité de posséder une neurogenèse adulte abondante, permettant des analyses sur cellules souches neurales adultes.

De nos jours, l'évaluation du risque écologique repose sur des critères macroscopiques. Cependant, il est souhaitable de produire des données sur différentes échelles biologiques afin de comprendre les processus toxiques et identifier des marqueurs moléculaires plus précoces des observables effets fonctionnels. Ainsi, nous souhaitons mettre en relation la prolifération et différenciation cellulaires et la neurotransmission avec des paramètres individuels intégrateurs comme l'anxiété et la sociabilité.

Nous avons exposé des poissons zèbre adultes à des débits de doses de 50  $\mu$ Gy/h, 0,5 et 5 mGy/h durant 36 jours dans l'installation MICADO'LAB. Ces niveaux d'exposition sont proches de la valeur de référence recommandée pour la radioprotection des écosystèmes (10 $\mu$ Gy/h) et sont comprises dans le domaine des faibles débits de doses (<6 mGy/h). Après dissection du télencéphale (partie antérieure du cerveau), des analyses globales du transcriptome montrent des dérégulations de gènes nécessaires à la neurotransmission (sérotonine), la neurogenèse adulte (atf3 et insm1a) et le système neuroendocrinien, en particulier l'ocytocine impliquée dans la régulation de la réponse au stress et la sociabilité. Des analyses d'immunocytochimie sur coupe confirment certains des résultats et suggèrent fortement que les irradiations chroniques à des doses modérées à faibles de RI peuvent altérer les fonctions cérébrales chez l'adulte. La mesure de l'activité de l'acétylcholinestérase aux niveaux des muscles et du cerveau n'est pas modifiée. Deux tests comportementaux sont en cours d'analyse afin d'évaluer si ces perturbations neurologiques sont prédictives de changement au niveau des phénotypes individuels.

## SUJET DE LA THÈSE

### Impact de l'inhalation de particules de tungstène sur le système nerveux central : étude de neurotoxicité et conséquences sur la neurogénèse olfactive chez le rat

Doctorant :	Léo MACE
Date du début de la thèse :	02/10/2018
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Chrystelle IBANEZ
Directeur de thèse :	Laurence ROY - IRSN
Co-directeur :	Michelle BLOCK - Indiana University School of Medicine
Financement de thèse :	IRSN

Principale cause de contamination dans les installations nucléaires, l'impact des expositions à des aérosols particuliers soulève des enjeux sanitaires préoccupants. Le cerveau représenterait une cible directe notamment *via* l'implication de la voie d'entrée par le nerf olfactif. Il existe un manque de connaissances en matière de toxicologie du tungstène sur le système nerveux central, pourtant considéré comme un contaminant émergent dans la littérature. Les situations d'exposition en lien avec les activités nucléaires concernent certaines opérations de démantèlement et les réacteurs de fusion nucléaire (ITER). Afin d'étudier les effets potentiels d'une exposition aux particules de tungstène, des travaux préalables de métrologie ont été réalisés pour maîtriser la génération de l'aérosol à des concentrations de l'ordre de la Valeur limite Moyenne d'Exposition professionnelle, et pour caractériser sa granulométrie.

Des campagnes d'exposition par inhalation ont été réalisées à deux concentrations différentes (5 et 80 mg.m<sup>-3</sup>) en mode aigu et répété sur 1 semaine sur le rat adulte. L'étude de processus impliqués en toxicologie cérébrale (neuroinflammation, stress oxydatif, mort cellulaire, neurogénèse) a été entreprise à plusieurs niveaux d'analyses biologiques.

Les résultats obtenus 24 heures après exposition ont permis d'observer des modifications régionalisées et dépendantes de la concentration pour les transcrits impliqués dans ces processus cibles. L'implication du stress oxydant fait l'objet actuellement d'une évaluation plus approfondie par l'utilisation de la sonde Dihydroethidium sensible aux espèces réactives de l'oxygène, complétée par une observation en immunohistochimie et au niveau de l'expression protéique de 4HNE et Nrf2 respectivement témoin de la peroxydation lipidique et de la signalisation antioxydante. Des expériences d'immunohistochimie suggèrent un effet potentiel sur la densité et la morphologie des cellules microgliales impliquées dans la neuroinflammation ainsi qu'un phénotype anormal des noyaux de certains neurones matures potentiellement signe d'une souffrance neuronale. Au niveau cellulaire, les effets sont également régionalisés, dépendants du mode d'exposition et de la concentration et pourraient impliquer plusieurs voies de signalisation, investiguées dernièrement par transcriptomique. Les dosages ICP-MS montrent une augmentation de la concentration de W dans les structures cérébrales chez les groupes exposés à forte concentration qui pourrait contribuer à une régionalisation des effets. Une campagne d'exposition ciblée vise à étudier si ces effets sont liés à des mécanismes adaptatifs ou sont neurotoxiques et finalement altèrent l'intégrité neuronale selon les schémas d'exposition.

Ces résultats pourraient contribuer aux recherches portant sur l'impact des aérosols particuliers, notamment métalliques, sur le cerveau, et ainsi à moyen terme, permettre d'améliorer les règles de (radio)protection.

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

---

La radiothérapie stéréotaxique est une technique de haute précision balistique, permettant l'irradiation de très petits volumes. C'est une alternative thérapeutique pour 30% de patients à haut risque chirurgical, atteints de cancer bronchique primitif localisé. Malgré la réduction du volume irradié, certains patients développent des pneumopathies radiques. L'acquisition par l'IRSN d'un irradiateur du petit animal a permis au laboratoire d'acquies un recul sur les effets anatomopathologiques de l'irradiation stéréotaxique pulmonaire chez la souris, et de mettre en évidence un infiltrat macrophagique au niveau du site lésionnel. Les macrophages sont des cellules connues pour être impliquées dans les processus fibreux, y compris radio-induits.

L'objectif de cette 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. Pour cela, l'immunohistologie nous permettra de localiser ces sous-populations de macrophages et la cytométrie en flux de les quantifier précisément. D'autre part, nous voulons comprendre l'influence de ces macrophages dans le développement de ces lésions par l'utilisation d'une souche de souris CCR2-KO, chez lesquelles le recrutement est abrogé, et en comparant leurs lésions avec celles de souris sauvages.

Cette première année de thèse a consisté à réaliser les irradiations des animaux pour les expériences d'histologie et de cytométrie. Deux doses sont utilisées : 60 Gy (générant une fibrose lente) et 80 Gy (générant une fibrose rapide). Les résultats sont observés à différents temps post-irradiation, de 3 jours à 12 mois. Les études de sévérité sont en cours. Nous avons déjà observé un épaississement des septas alvéolaires, indicateur d'une inflammation, avec un décalage dans la cinétique chez les souris CCR2-KO. Nous observons également une différence de distribution des sous-populations de macrophages entre les deux doses, avec une absence de macrophages M1 après irradiation à 60 Gy. Par ailleurs, la technique de digestion tissulaire, ainsi que le panel de marqueurs utilisé pour la cytométrie sont au point et les expériences sont en cours. Ces travaux permettront de mettre en évidence d'éventuelles différences entre les sous-populations de macrophages, après irradiation stéréotaxique pulmonaire, entre les souris sauvages et CCR2-KO. Ces différences pourraient expliquer les disparités dans la sévérité des lésions.

La suite du projet répondra à la question de l'origine circulante des macrophages tissulaires dans ce modèle par la technique de parabiose. Enfin, une étude Single Cell RNAseq permettra d'avoir une idée précise des populations macrophagiques minoritaires intéressantes dans le développement des lésions pulmonaires.

## SUJET DE LA THÈSE

### Régulation des interactions entre les monocytes et les cellules endothéliales dans un contexte de radiothérapie

Doctorant :	Sékolène LADAIGUE
Date du début de la thèse :	29/09/2018
École doctorale :	Sorbonne Université / Physiologie, Physiopathologie et thérapeutique
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Olivier GUIPAUD
Directeur de thèse :	Olivier GUIPAUD - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

L'irradiation des tissus sains lors de la radiothérapie induit des effets secondaires délétères. Le recrutement immunitaire radio-induit, notamment des macrophages, participe au développement de ces effets. Cependant les mécanismes sous-jacents restent méconnus. Les monocytes constituent la forme circulante et recrutée des macrophages, et interagissent avec les cellules endothéliales (CE) vasculaires afin d'entrer dans le tissu. L'objectif de ma thèse est d'évaluer le rôle d'acteurs endothéliaux comme les N-glycosylations hautement mannosylées (NGHM) ainsi que de la mannosidase MAN1C1 dans le recrutement des monocytes post-irradiation. Cette thèse répond à l'objectif de l'IRSN de compréhension des effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants en clinique.

Des approches *in vitro* et *in vivo* sont utilisées pour ce projet. Le suivi des étapes du recrutement immunitaire comme l'adhésion et la transmigration endothéliale (TME) des monocytes est possible par vidéo-microscopie. Ces tests sont effectués sur des modèles cellulaires humains comme les THP-1 (monocytes) et les HUVECS (CE) irradiées à 20 Gy. Les NGHM sont augmentées sur les HUVECs et participent à l'adhésion des THP-1 après irradiation<sup>1</sup>. D'autre part, MAN1C1 est une enzyme impliquée dans la maturation des N-glycosylations et pourrait réguler les NGHM post-irradiation. Cette hypothèse est testée par inhibition et surexpression de *man1c1* dans les HUVECs. *In vivo*, le rôle des NGHM dans le recrutement précoce des cellules immunitaires (entre 1 et 7 jours post-irradiation) est étudié par microscopie intravitale sur les vaisseaux mésentériques et par marquages immunohistochimiques après une irradiation abdominale à 18 Gy chez la souris.

A ce jour, la mise au point d'un outil robuste pour évaluer la TME (système Incucyte S3) nous a permis de montrer que l'irradiation des HUVECs augmente la migration des THP-1 de manière dose dépendante. L'inhibition de *man1c1* impacte les NGHM ainsi que l'adhésion et la transmigration des THP-1. Les expériences en condition de surexpression de *man1c1* sont en cours. Le rôle des NGHM dans le recrutement des monocytes *in vivo* sera analysé par immunohistologie chez des souris irradiées ayant reçu ou non une molécule ciblant ces glycosylations (lectines ou compétiteurs).

Pour conclure, ces travaux suggèrent que MAN1C1 a un rôle de régulation du recrutement des monocytes via les NGHM dans les CE irradiées. *In vivo*, l'étude du rôle des NGHM sur l'infiltration immunitaire post-irradiation est en cours. Si les résultats confirment notre hypothèse, les NGHM pourraient se révéler une cible de choix afin de limiter le recrutement des monocytes/macrophages et ainsi les toxicités radio-induites associées.

1. Jaillet, C. *et al.* Radiation-induced changes in the glycome of endothelial cells with functional consequences. *Scientific reports* 7, 5290, doi:10.1038/s41598-017-05563-y (2017).





## ➤ Mercredi 31 mars

09h00 - 10h15 La Grande Motte

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ MODÉLISATION DU COMPORTEMENT CHÉMO- MÉCANIQUE DES MILIEUX ARGILEUX ET CIMENTAIRES

**Président : Olivier LOISEAU**

Chef de service - PSN-EXP/SSREP

**Yara BARAKAT** - Impact of saline / alkaline plumes on the swelling and self-sealing behavior of a clay damages rock.

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

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

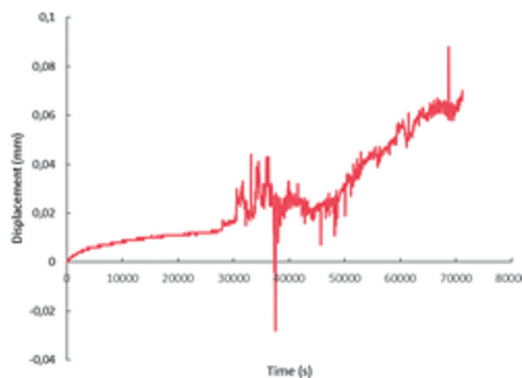
SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant : Yara BARAKAT  
 Date du début de la thèse : 13 /01 /2020  
 École doctorale : Écoles des ponts - Paris Tech / Science, Ingénierie et Environnement  
 Laboratoire d'accueil : PSE-ENV / SEDRE / LETIS & Laboratoire Navier  
 Tuteur de thèse : Nadia MOKNI  
 Directeur de thèse : Yu Jun CUI - Ecole des Ponts- Paris Tech  
 Financement de thèse: IRSN / FANC

Deep geological disposal of High or Intermediate Level and Long Lived radioactive waste is a primary investigation topic in industrialized countries using nuclear power for large-scale energy production. In France such an installation is foreseen in the clayey rock of the Meuse Haute-Marne site. It is well known that excavation process of underground facilities inevitably leads to the creation of an Excavation Damaged Zone (EDZ) in the surrounding clay host rock, which can act as preferential pathways for the migration of pollutants. Several studies have shown that EDZ is able to recover its initial properties over time by self-sealing, owing to progressive re-saturation by underground water seepage. However, very few research studies have investigated the effect of highly saline and alkaline plumes, coming from the waste and concrete components, on the mechanical and transport properties of the damaged clay host rock. Within this context, an experimental research program has been launched to determine the chemical, mechanical and hydro-dynamical perturbations caused by concentrated saline and alkaline solutions on the swelling and self-sealing behavior, permeability and structure evolutions (pore and mineralogy) of damaged OPAlinus clay (OPA) samples. This claystone formation is considered as a potential host rock for the Swiss deep geological repository for radioactive waste. Particular attention is given to liquid retention properties, volume change behavior at different osmotic suctions and pH values, as well as to sealing properties. For the self-sealing experiments, OPA Samples were prepared to cylinders with an artificially created single planar fracture through its axis and placed in a dedicated set-up (Fig1a). The sample is initially exposed to synthetic water, having the same chemical composition as the pore water of OPA claystone (pH~ 7 and osmotic suction ~1MPa). Radial swelling pressure and swelling pressure within the fissure are recorded. In addition a clip-type displacement transducer is used to measure the fissure closing displacement (Fig 1b). To explore the effect of pore fluid concentration on compressibility, odometer tests involving swelling and loading/unloading paths were performed on OPA non damaged samples exposed to synthetic water and concentrated NaNO<sub>3</sub> solution (osmotic suction ~ 34 MPa). The increase of osmotic suction reduced the swelling potential and increased the compressibility of the material. Liquid retention properties of OPA samples at different initial dry densities and for different pH and osmotic suction values were measured. Different preparation protocols were adopted.

The modification of the liquid retention behavior of the material induced by salinization and pH increase will be crucial for the interpretation of the self-sealing results.



a) Fig 1 Self-sealing test (a) View of the testing cell. b) First results. Evolution of fissure closure as a function of time.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Charlotte DEWITTE
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Ecole doctorale :	Université de Toulouse / Mécanique, énergétique, génie civil, procédés
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Mejdi NEJI – IRSN / Alexandra BERTRON - LMDC
Directeur de thèse :	Alexandre DAUZERES – IRSN
Co-Directrice :	Laurie LACARRIÈRE – LMDC
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 le système de scellement des galeries. A ce stade du projet, celui-ci serait composé 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.

L'objectif de la thèse est d'étudier l'influence de la précipitation des M-S-H sur le comportement chémo-mécanique des matériaux cimentaires. Pour cela, une caractérisation chimique, couplée à une caractérisation mécanique, des matériaux est réalisée pour comprendre les mécanismes de précipitation des M-S-H et ainsi permettre d'appréhender l'impact de l'enrichissement en magnésium sur les changements microstructuraux et les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire. L'étude multi-échelle se concentre à la fois sur des matériaux modèles et sur des matériaux industriels. Les matériaux modèles sont des pâtes de M-S-H et des pâtes de C-S-H. Les pâtes de M-S-H servent à la caractérisation chémo-mécanique de l'hydrate seul, tandis que les pâtes de C-S-H sont immergées dans du  $MgCl_2$  pour provoquer la formation de M-S-H et identifier l'impact de cette phase sur le comportement mécanique du matériau modèle.

Plusieurs protocoles ont été mis au point afin d'obtenir des pâtes de M-S-H les plus pures possible vis-à-vis de cet hydrate. Les pâtes ont été caractérisées chimiquement et structurellement. Un programme de tests spécifiques au nano-indenteur est en cours de réalisation afin de caractériser mécaniquement les échantillons. Les pâtes de C-S-H et les matériaux industriels ont été réalisés avec succès. La méthode de dégradation est en cours de test sur une batterie d'échantillons.

L'ensemble des connaissances recueillies sur ces matériaux permettra de mieux appréhender l'évolution mécanique à long-terme des bétons bas-pH, dont les évolutions chimiques ont déjà fait l'objet d'études antérieures (projet CEMTEX, etc.), pour améliorer l'expertise de l'IRSN.

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

Dans le cadre du projet Cigéo (installation de stockage réversible des déchets radioactifs) et de l'extension de la durée d'exploitation des centrales nucléaires, l'IRSN étudie 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. L'Institut s'intéresse particulièrement aux réactions sulfatiques externes (RSE). Ces pathologies entraînent la précipitation d'ettringite et de gypse dans les pores du matériau, pouvant conduire à l'apparition de pressions internes et à sa fissuration, impactant ainsi ses propriétés de confinement.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir la compréhension des mécanismes expansifs engendrés par la présence de sulfate en contact avec un matériau cimentaire fissuré. Le travail de thèse combine la modélisation numérique d'un phénomène et l'acquisition des données expérimentales associées pour la validation du modèle. La simulation de l'évolution des propriétés physico-chimiques de pâtes hydratées de trois types de ciment CEM I, suite à leur mise en dégradation dans un milieu sulfaté, a été réalisée à l'aide du code de transport réactif HYTEC (MINES ParisTech). En parallèle, une campagne de caractérisation de la composition minéralogique de l'une des pâtes, mise en dégradation dans une solution de sulfate de concentration 30 mmol/L, a été menée à différentes échéances. Les cartes élémentaires du soufre et du calcium, obtenues par analyse MEB-EDS (figure), révèlent d'une part, la précipitation d'un produit sulfaté et d'autre part, la décalcification des C-S-H et de la portlandite, deux processus intervenant lors d'une RSE.

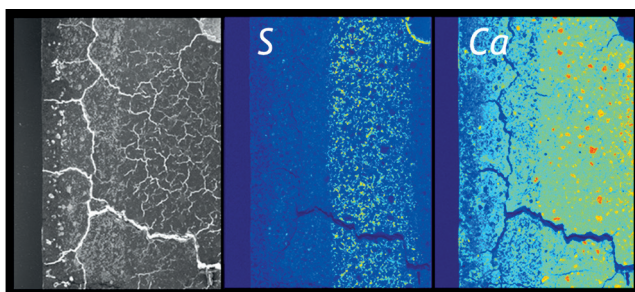


Image MEB-SE et cartes élémentaires MEB-EDS du soufre et du calcium d'une pâte de ciment après 3 mois de dégradation dans une solution de sulfate de sodium.

Les modifications de la microstructure de la pâte de ciment résultent de la formation de gypse dans la zone endommagée pour les deux échantillons et révèlent une progression de la zone de précipitation au cours du temps. La caractérisation des propriétés mécaniques locales par nano-indentation est en cours. Par la suite, il est prévu d'utiliser le logiciel XPER (IRSN), basé sur la théorie des éléments cohésifs pour décrire l'évolution de la fissuration, en couplant le transport réactif, l'évolution des propriétés mécaniques et la fissuration dans le matériau.

## ➤ Mercredi 31 mars

10 h 35 - 11 h 35

SESSION POSTER

11 h 40 - 13 h 00 L'auditorium

SESSION PARALLÈLE

### ➤ IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN REJET RADIOACTIF ACCIDENTEL

**Président : Didier GAY**

Adjoint au directeur de la stratégie, délégué aux affaires scientifiques  
Direction de la stratégie

**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.

**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*.

**Dina OKHRIMCHUK** - Study of the long-term behaviour of <sup>137</sup>Cs atmospheric fallouts in French forests.

**Gauthier FONTAINE** - Analyse épistémologique des incertitudes liées à l'élaboration et l'usage de modèles dans le domaine de l'environnement.

## 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
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Jean-Marc BONZOM / Olivier ARMANT
Directeur de thèse :	Patrick LALOI - IRSN
Co-directeur :	André GILLES - Aix-Marseille Université
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 radiocontamination – plusieurs années/génération 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 des accidents nucléaires majeurs sur l'évolution des populations reste pour autant marginale. Ce projet de recherche doctoral se propose de revisiter ces conséquences sur les populations de faune sauvage 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'étude 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.* 2020 : <https://urlz.fr/eKaM>). A l'aide de simulations de populations, nous concluons à une augmentation importante du taux de mutations mitochondriales. 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 est en cours d'analyse. Une mission de terrain à Fukushima prévue en 2021 permettra la comparaison 10 ans après cet accident. Enfin, des échantillons de mésanges (*Parus major*) prélevés en 2018 dans la région de Tchernobyl nous permettront également d'étudier la génétique des populations de cette espèce en comparaison à d'autres populations européennes.

Dès à présent, l'étude d'un marqueur mitochondrial à partir d'échantillons de rainettes japonaises semble indiquer l'existence de nombreuses substitutions pouvant être dues à des mutations apparues suite à l'accident. Cependant, seule la comparaison à des populations de rainettes japonaises actuelles nous permettrait de confirmer l'existence d'un processus semblable à celui observé dans la région de Tchernobyl. Une difficulté rencontrée sera donc la réalisation d'une mission de terrain au Japon en 2021 en condition de pandémie Covid-19.

## 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*

Doctorant :	Magali SCHIANO DI LOMBO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Yann PERROT
Directeur de thèse :	Beatrice GAGNAIRE - IRSN
Co-directeur :	Jérôme CACHOT - Université de Bordeaux - laboratoire EPOC
Financement de thèse :	IRSN

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

Les effets spécifiques induits par les rayonnements beta sur les organismes sont peu connus. Ces questionnements s'intègrent dans notre stratégie scientifique et visent à mieux caractériser les effets d'une exposition aux faibles doses. L'ensemble des travaux déjà réalisés au LECO ont permis de révéler des différences de mécanismes d'action des rayonnements beta émis par le tritium en fonction de la forme considérée (TOL [Tritium Organiquement Lié] ou HTO [eau tritiée]). Cette thèse a pour but de caractériser les effets, la répartition subcellulaire et la dose générée par le tritium (sous forme de thymidine tritiée) en (a) caractérisant la dose générée par le tritium en fonction de sa répartition subcellulaire, (b) en liant la dose aux effets observés chez les larves et sur la reproduction chez l'adulte et (c) en liant la dose aux effets observés chez les larves issues de parents contaminés. Dans un premier temps, des œufs de poisson zèbre seront exposés à de la thymidine tritiée à des débits de dose allant de 0,4 à 4 mGy/h. Les effets aux niveaux développementaux, immunologiques, musculaires et comportementaux seront étudiés. Dans un second temps, des poissons adultes seront exposés à ces mêmes débits de dose et les mêmes types d'effets seront étudiés ainsi que la reproduction de ces derniers. Les doses générées à l'échelle appropriée seront évaluées par des simulations numériques (collaboration LDRI).

Une expérience préliminaire a montré qu'à une activité de  $6,1 \times 10^4$  Bq/mL, l'internalisation de la thymidine tritiée générait un débit de dose interne de 0,6 et 0,2 mGy/h respectivement pour les œufs et les larves. De plus, cette expérience a confirmé que le tritium était internalisé sous forme organique et que l'internalisation était très dépendante des conditions expérimentales. Une seconde série d'expériences ont été menée pour caractériser les conditions expérimentales les plus sensibles.

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

Atmospheric releases of radionuclides (RN) led to the contamination of various ecosystems. Radiocaesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) is the most common long-lived RN in the affected areas. Forests are sinks of pollutants due to the high capture efficiency of their canopies and their ability to recycle chemical elements or RNs on long term. The TREE4 model was parametrized, tested and validated for short to medium-term relying on datasets from Japanese forests stands contaminated by the  $^{137}\text{Cs}$  released by the Fukushima accident. The objective of this PhD is transposing TREE4 to the French forests and assessing the  $^{137}\text{Cs}$  behaviour on long term.

To address this issue, recovering knowledge on behaviour, distribution and biogeochemical cycle (BGC) of  $^{137}\text{Cs}$  and its chemical analogues (K,  $^{133}\text{Cs}$ ) is a prerequisite and a literature review was performed. This task led to establishing a methodology to estimate biological fluxes of K in the forest (root uptake vs. immobilization vs. internal translocations). Sampling campaigns on 5 RENECOFOR (ONF) monitored stands (European beech, Norway spruce, Scots pine, English and Sessile oaks) began in January 2021 to provide datasets according to the BGC flux calculation methodology and determining the distribution of Cs isotopes and K.

Characterization of forest stand dynamics at the studied sites based on RENECOFOR data and review of allometric biomass models published in the literature for the tree species under investigation was started but is still underway. Modelling the biomass growth of the forest stand over the study period (1950-2020) is a challenging issue due to the great variability observed between tree individuals and missing data or unknown conditions before RENECOFOR monitoring started (1992). Biometrics from sampled trees will complete this work.

For 2021, in parallel with data acquisition from sampled stands (See figure), determination of  $^{137}\text{Cs}$  respective contributions of Global fallouts vs. Chernobyl deposits and hydrologic data analysis on investigated sites will complete data acquisition for TREE4 transposition purpose.



*Sampling campaign in January 2021 (European beech)*



## SUJET DE LA THÈSE

## Analyse épistémologique des incertitudes liées à l'élaboration et l'usage de modèles dans le domaine de l'environnement

Doctorant :	Gauthier FONTAINE
Date du début de la thèse :	01/10/2018
École doctorale :	Sorbonne Université/ École doctorale de philosophie
Laboratoire d'accueil :	PSN-EXP/ SHOT/LSHS
Tuteur de thèse :	Olivier CHANTON
Directeur de thèse :	Pierre WAGNER - Université Paris 1
Financement de thèse :	IRSN

Le tournant « modélisitique » de la philosophie des sciences s'attache à décrire le statut et le rôle de la modélisation au sein de la science. L'ensemble de ces travaux s'enrichit sans cesse de nouvelles études de cas, car la grande variété de modèles et modélisations permet d'étoffer cette épistémologie nouvelle. La thèse dont l'avancement sera ici présenté s'inscrit dans ce courant : il s'agit d'étudier un exemple de domaine de modélisation et de simulation, la contamination radiologique post-accidentelle, afin d'apporter un recul philosophique permettant à la fois de mieux inscrire ces activités dans la théorie de la connaissance mais aussi d'enrichir l'épistémologie des modèles de contamination de nouvelles conclusions ou questions.

Les travaux ici exposés portent donc sur l'analyse des processus d'élaboration et d'usage des modèles et simulations destinés à évaluer l'impact d'un accident nucléaire (Tchernobyl, Fukushima) sur les populations et les écosystèmes. Ce domaine de recherche est au carrefour de nombreuses thématiques scientifiques et extrascientifiques qui offrent l'opportunité d'interroger l'influence de nombreux facteurs (scientifiques, techniques, sociaux ou politiques) sur la création et l'utilisation de ces modèles. Il s'agit alors d'étudier les apports et statuts épistémologiques et méthodologiques de ceux-ci, en nous appuyant notamment sur les archives de l'Institut, sur un corpus de documents techniques de référence de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et sur les témoignages des différents acteurs concernés.

L'approfondissement de ces questions s'est pour l'instant fait selon deux voies.

Dans la première, je me suis intéressé au coefficient de distribution, paramètre-clé autour duquel sont construits les modèles d'évaluation du transfert de la radioactivité dans l'environnement. L'utilisation de ce coefficient est très controversée, et pourtant celui-ci résiste aux approches « concurrentes » qui émergent. Je cherche alors d'une part à expliquer ce phénomène de persistance, et d'autre part à caractériser la nature des résultats issus d'un modèle qui se base sur une aussi grande idéalisation de la nature, le tout afin d'interroger la légitimité des usages de ce type de modèles par rapport aux fonctions qu'ils peuvent réellement remplir.

Dans la seconde, je cherche à explorer le statut épistémologique des accidents. En effet, le domaine de recherche étudiée repose en grande partie sur l'étude des situations réelles comme Tchernobyl, Fukushima ou Windscale-Sellafield. Pour autant, dans quelle mesure ces événements peuvent-ils constituer des expériences scientifiques à part entière ?



## ➤ Mercredi 31 mars

11 h 40 - 13 h 00 La Grande Motte

### SESSION PARALLÈLE

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

**Président : Alain BRUNISSO**

Chargé de mission "Partenariat" - Direction de la stratégie

**Hantao LIN** - Évaluation de la contribution du mécanisme d'échange isotopique à l'épuration de l'iode radioactif - Application aux tests de pièges à iode par une méthode non-radioactive.

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

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

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

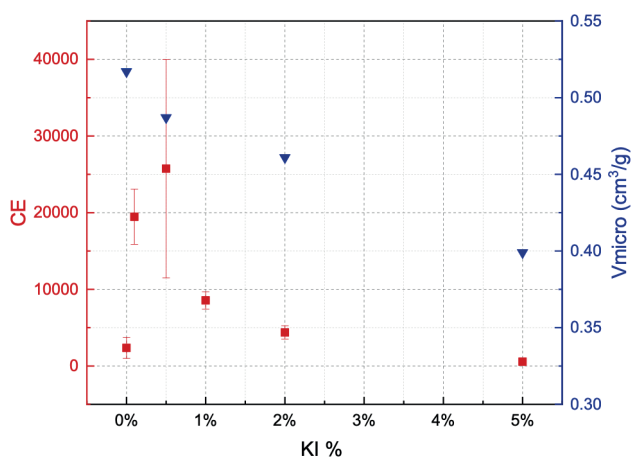
## SUJET DE LA THÈSE

## Évaluation de la contribution du mécanisme d'échange isotopique à l'épuration de l'iode radioactif – Application aux tests de pièges à iode par une méthode non-radioactive

Doctorant :	Hantao LIN
Date du début de la thèse :	02/10/2018
École doctorale :	Sorbonne Université / Chimie Physique et Chimie Analytique de Paris-Centre
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SCA / LECEV
Tuteur de thèse :	Céline MONSANGLANT-LOUVET
Directeur de thèse :	Denis DOIZI – CEA
Financement de thèse :	IRSN

Les charbons actifs (CA) imprégnés sont utilisés pour la rétention de  $\text{CH}_3\text{I}$  dans les réseaux de ventilation des installations nucléaires<sup>1</sup>. Dans le cadre du programme « IODE », cette étude vise à comprendre la contribution de l'échange isotopique entre  $\text{K}^{127}\text{I}$  des CA et  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$  gazeuse en comparaison avec d'autres mécanismes d'adsorption.

Les résultats de caractérisation des CA imprégnés au KI par porosimétrie de  $\text{N}_2$  à 77 K montrent un blocage partiel de la microporosité, ce qui entraîne une diminution des capacités d'adsorption pour  $\text{CH}_3^{127}\text{I}$  ( $T = 30^\circ\text{C}$ , H.R. de 0 à 40%). La détermination des coefficients d'épuration (CE) pour  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$  nous permet d'obtenir plus d'informations sur l'échange isotopique. En premier lieu, une augmentation des CE jusqu'à environ  $10^4$  a été constatée pour des teneurs en KI allant de 0 jusqu'à 0,5 wt% (H.R. = 40% à  $20^\circ\text{C}$ ) (figure). Cette augmentation pourrait être attribuée à l'échange isotopique entre  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$  et  $\text{K}^{127}\text{I}$  dans les micropores encore disponibles. En effet il est décrit dans la littérature<sup>2</sup> que l'échange isotopique sous forme gazeuse nécessite une première phase de physisorption. En revanche, une chute des volumes microporeux de 20% a été observée de 0,5 à 5 wt% en KI, entraînant une diminution des CE jusqu'à 600 (figure). Par ailleurs, une évolution croissante du CE, suivie par un palier, a été observée pour ces mêmes charbons à H.R. = 90%. Cette augmentation constitue également une preuve qualitative de l'échange isotopique. Les faibles valeurs de CE obtenues dans ces conditions sont dues à la saturation des sites par la vapeur d'eau<sup>3</sup>.



Évolution des CE pour  $\text{CH}_3^{131}\text{I}$  en fonction de la teneur en KI ( $T=20^\circ\text{C}$ , H.R. = 40%)

Cette étude a montré qualitativement la présence d'échange isotopique dans certaines configurations. Cependant, la quantification de cette réaction doit être évaluée en comparant les courbes de percée en actif et en inactif. Une des complexités de cette recherche réside dans le cas radioactif, où les courbes de percée sont obtenues *ex situ* par spectrométrie  $\gamma$ . Pour cela, un banc d'essai spécifique est en cours de validation.

1. R. T. Jubin, Citeseer, 1979.

2. J. L. Kovach, Proc. of 25<sup>th</sup> DOE/NRC, 1992, vol. 22, p. 646.

3. C. M. Ecob, et al., Sci. Total Environ., vol. 130–131, no. C, pp. 419–427, 1993

## 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
École doctorale :	Université Paul Sabatier Toulouse III / Sciences de la Matière
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	François VIROT
Directeur de thèse :	Damien CONNETABLE - CIRIMAT
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 champ magnétique dans une chambre à vide. Les conditions très sévères qui résultent de la réaction de fusion, les critères liés à la stabilité de celle-ci et la nécessaire limitation de l'absorption du tritium (T) dans la paroi pour des considérations de sûreté limitent le choix des matériaux éligibles pour la première paroi de la couverture de la chambre à vide. De ces raisons, a découlé le choix du béryllium comme matériau de première paroi. 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 pour : quantifier l'inventaire en tritium dans la chambre, étuver la première paroi pour la désorption du tritium, et 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). La formation de ce dernier est attendue en surface de la première paroi et plus généralement aux joints de grains, en raison de la grande affinité du béryllium pour l'oxygène (purification du plasma). Cette thèse s'articule donc autour de deux sujets : l'insertion et la diffusion des HI dans BeO puis l'interaction des HI aux joints de grains (ségrégation et diffusion) du béryllium.

Nous avons étudié l'insertion des HI dans les sites interstitiels selon leurs formes chimiques (atomique, moléculaire et chargée) ainsi que la ségrégation des HI dans des mono-lacunes neutres et chargées. Les défauts de Frenckel et Schottky ont été également étudiés. Nous montrons que l'hydrogène est stable sous sa forme atomique, chargé ( $H^+$  et  $H^-$ ) et neutre ( $H^0$ ). En accord avec une précédente étude théorique<sup>1</sup>, l'hydrogène se révèle également plus stable sous sa forme moléculaire ( $H^2$ ). En ce qui concerne le piégeage de l'hydrogène dans les lacunes, les énergies de ségrégation pour de nombreuses configurations chargées et non chargées ont été calculées. Comme attendu, les mono-lacunes stabilisent l'insertion d'hydrogène, en particulier  $V_{O^{2+}}$  et  $V_{Be^{2-}}$ . En utilisant cet ensemble de données énergétiques, la solubilité des HI dans l'oxyde de béryllium a été ensuite évaluée. Enfin les chemins de migration de l'atome d'hydrogène chargé et de l'hydrogène moléculaire dans BeO ont été déterminés ainsi que les coefficients de diffusion associés.

1. E. A. Hodille, Y. Ferro, Z. A. Piazza, and C. Pardanaud. J. Phys. Condens. Matter, 30, 305201 (2018)

## SUJET DE LA THÈSE

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

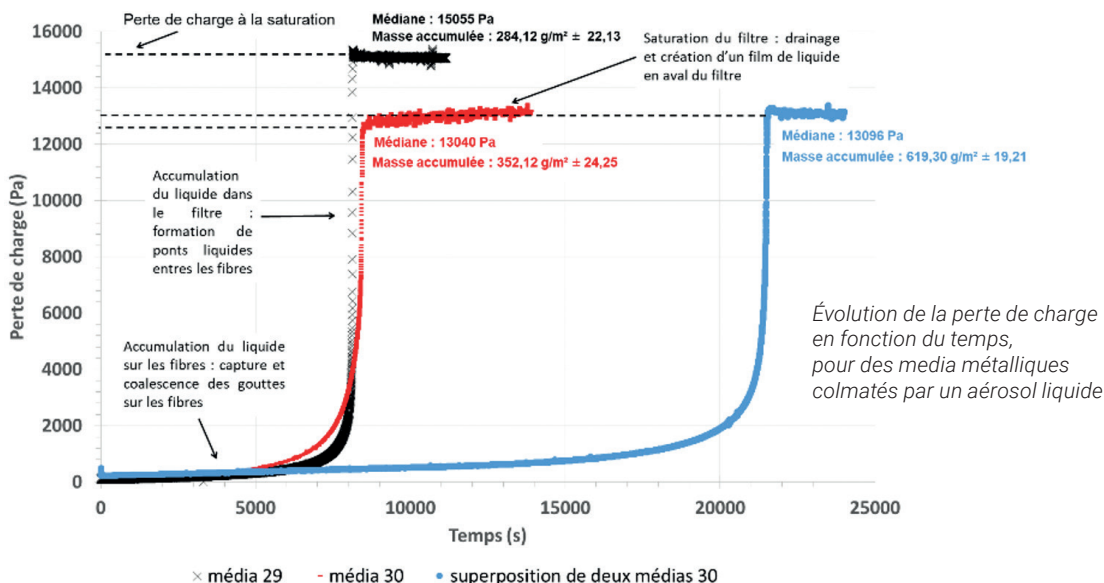
Doctorant :	Marie LECOQ
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Université de Lorraine / Sciences et Ingénieries des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SCA / LECEV
Tuteur de thèse :	Soleiman BOURROUS
Directeur de thèse :	Dominique THOMAS - LRGP
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 (THE) d'un éventuel rejet de liquide sous forme de gouttelettes en suspension (aérosol liquide) qui pourrait affecter leurs performances (en réduisant leur résistance mécanique et leur capacité à retenir les contaminants aéroportés). 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 différentes étapes de colmatage. Toutefois, peu d'études ont conduit à l'élaboration d'un modèle simple et prédictif de l'évolution des performances de ces équipements (perte de charge et efficacité). Ceci est dû aux nombreux paramètres influençant la filtration, notamment les caractéristiques du liquide (masse volumique, viscosité, tension superficielle), de l'aérosol liquide (taille des particules) et du filtre (diamètre des fibres, épaisseur, compacité), ainsi que les conditions opératoires (vitesse de filtration notamment).

La première année de la thèse a permis de caractériser les filtres métalliques en termes de diamètres de fibre, de compacité et d'épaisseur, à l'aide d'un programme de traitement d'images de microscopie. L'influence des caractéristiques des filtres et de la vitesse de filtration sur leur résistance aéroulique a ensuite été quantifiée.

Les filtres métalliques testés ont une perte de charge (figure) qui évolue de façon quasi-linéaire (correspondant au moment où les gouttelettes sont capturées et coalescent sur les fibres), avant de croître exponentiellement (traduisant la formation de ponts liquides entre les fibres) et de se stabiliser à la saturation du medium métallique (correspondant à un équilibre entre la quantité de liquide envoyée dans le filtre et celle drainée). La masse de liquide accumulée dans le filtre et la perte de charge à saturation sont influencées par les caractéristiques des media. La vitesse de filtration influence la résistance à l'écoulement induit par le filtre mais pas la quantité de liquide accumulée dans le filtre ; ainsi, le liquide se répartit dans le filtre de façon différente au sein du medium.

Ce travail devra être complété avec d'autres media métalliques ayant des caractéristiques différentes. Une étude spécifique portant sur l'influence des propriétés physico-chimiques du liquide (telles que la viscosité) complètera ce travail avec l'objectif de caractériser l'accumulation de liquide entre les fibres du medium.



## 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

Docteurant :	Mohamad FARHAT
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN - Aix-Marseille Université
Co-directeur :	Maxime CHINAUD - Aix-Marseille Université
Financement de thèse :	IRSN/Région PACA/EDF

Pool scrubbing is a significant filtration mechanism that is implemented and presented in different nuclear plants. It comprises physical and chemical processes that impact the retention of radioactive fission products suspended in gas bubbles rising in a liquid pool. The retention of fission products mainly depends on bubble hydrodynamics, which characterization is fundamental to determine the filtration efficiency (decontamination factor DF).

Through this thesis, we aim to characterize the bubbles hydrodynamics and iodine retention mechanisms upon injecting carrier gas from a submerged orifice, for different flow conditions (FCVS and SGTR situations). This contributes to IRSN research process dealing with the efficiency of mitigation or filtration systems implemented on LWRs (S1).

A bibliographic research on pool scrubbing has been achieved, where we clarified the involved physical and chemical processes and recalled the experimental and modelling works in literature. In parallel, we have carried out experiments in IUSTI/Marseille, investigating bubble hydrodynamics in the injection zone for a range of Weber numbers such as  $0.16 < We < 16$ , through optical techniques and image processing. We classified the flow morphologies and determined the bubbling frequency  $f_b$ , bubble sizes  $V_b$ , void fraction, and velocities. As air was injected at high momentum, non-linear flow patterns were induced, limiting the capability of classical approaches in determining precisely  $V_b$ . Thus, a phenomenological approach has been developed allowing to characterize the frequency and sizes of globules ( $f_G$ ,  $V_G$ ), which designates large bubbles generated after several coalescences in the injection zone. The globule sizes  $V_G$  are found to be generally larger than  $V_b$ , showing a weak applicability of literature models to predict characteristic bubbles sizes at high Weber number in this zone. This phenomenological approach is strengthened by validating the calculated flowrate experimentally ( $Q_{calc} = f_G \times V_G$ ) to the real injected flowrate ( $Q_{inj}$ ).

Through the current year, we are performing decontamination factor measurements on the experimental setup "GEMBARC", allowing to quantify the retention of  $CH_3I(g)$  by gas chromatography,  $I_2(g)$  and  $CsI$  aerosol by ICP-MS. In parallel, we conduct the first tests on the new experimental setup "TYFON". This latter allows to perform experiments coupling hydrodynamics and mass transfer characterizations under different conditions (gas and liquid temperatures). Optical techniques mentioned above are improved (higher frequencies for images acquisition, laser techniques,...), especially to compute a method to determine bubbles exchange surfaces. Finally, the extracted experimental database is intended for the qualification and validation of the implemented pool scrubbing models in the ASTEC code. Thus, it may be useful to propose later an improvement of these existing models or even a new analytical approach.



TYFON experimental device





## ➤ Mercredi 31 mars

14h00 - 15h15 L'auditorium

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ AÉROCONTAMINATION DANS LES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

**Président : Laurent RICCIARDI**

Adjoint au Chef de Service - PSN-RES/SCA

**Zeinab RIDA** - Mécanismes de transfert aéraulique au travers d'ouvertures d'enceintes de chantier : évaluation de la contribution du comportement aérodynamique des aérosols au phénomène de rétrodiffusion.

**Daniel HARDY** - Study of the processes of particle formation through the drying of droplets.

**Modou MBAYE** - Remise en suspension particulaire par impact de jet de liquide contaminé contre une surface.

**Delphine COSTA** - Validation des modèles de rétention de la pollution particulaire dans les équipements de réseau de ventilation.

## SUJET DE LA THÈSE

**Mécanismes de transfert aéraulique au travers d'ouvertures d'enceintes de chantier :  
évaluation de la contribution du comportement aérodynamique des aérosols  
au phénomène de rétrodiffusion**

Doctorant :	Zeinab RIDA
Date du début de la thèse :	05/11/2018
École doctorale :	Toulouse 3 / MEGEP
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SCA/LEMAC
Tuteur de thèse :	Corinne PREVOST / Thomas GELAIN
Directeur de thèse :	Eric CLIMENT - IMFT
Financement de thèse :	IRSN/ EDF

Dans les centrales nucléaires, les enceintes ventilées placées autour des zones contaminées limitent la propagation de la contamination vers l'extérieur, grâce au confinement dynamique. Toutefois, l'écoulement au droit d'une ouverture peut subir des inversions locales et instationnaires conduisant à transporter la contamination à l'extérieur, phénomène appelé rétrodiffusion.

Le premier objectif de ma thèse consiste à caractériser et à quantifier, sur une maquette existante (thèse de S. Kaissoun<sup>1</sup>), les phénomènes locaux de rétrodiffusion gazeuse et particulaire au niveau d'une ouverture rectangulaire créée sur des parois rigides et des parois souples, suite à une perturbation à contre-courant. De plus, l'ajout d'une enveloppe collectrice autour de cette maquette permet la quantification des transferts globaux à travers l'ouverture.

Le deuxième objectif de ma thèse consiste à comparer les courbes de rétrodiffusion gazeuse et particulaire acquises expérimentalement sur la maquette, avec celles issues de simulations numériques utilisant un modèle de turbulence hybride ; l'objectif à terme est de valider les résultats obtenus sur un sas ventilé à l'échelle réelle.

A l'aide des techniques d'imagerie laser permettant la visualisation et l'acquisition des champs de vitesse des écoulements (PIV), nous avons caractérisé les transferts d'espèces autour de l'ouverture. Les techniques de traçage gazeux et particulaire (aérosol de 5 microns) ont été mises en œuvre afin de quantifier l'amplitude de ces phénomènes de rétrodiffusion présents autour de l'ouverture. Les courbes d'intensité de rétrodiffusion ont ainsi permis de détecter le seuil de déclenchement du phénomène, et de comparer le comportement des polluants entre eux, en prenant en compte le dépôt du polluant particulaire dans la maquette et dans l'enveloppe collectrice.

Pour les simulations numériques, nous avons utilisé le modèle SST-DES afin d'obtenir les champs qualitatifs et quantitatifs qui décrivent le phénomène de rétrodiffusion des polluants gazeux et particulaires à proximité de l'ouverture. Les coefficients de rétrodiffusion obtenus par simulation numérique indiquent un comportement similaire entre le gaz et l'aérosol de 5 microns. Ainsi, nous constatons que les résultats expérimentaux obtenus localement pour les polluants gazeux et particulaire correspondent à ceux obtenus à partir des simulations numériques réalisées dans les mêmes conditions. Néanmoins, il n'est pas envisageable de conduire des simulations CFD avec le modèle retenu pour la prédiction des transferts globaux compte tenu des dimensions de l'enveloppe et du temps de calcul nécessaire.

Nos perspectives expérimentales et numériques sont de caractériser la rétrodiffusion autour de l'ouverture avec des parois souples, puis de tester la configuration d'un jet pariétal interne.

1. 'Mécanismes de transfert aéraulique au travers d'ouvertures : application à l'efficacité du confinement dynamique d'enceintes de chantier', Salima KAISSOUN, 2018

SUJET DE LA THÈSE

Study of the processes of particle formation through the drying of droplets

Doctorant :	Daniel HARDY
Date du début de la thèse :	01 /09 /2018
École doctorale :	University of Bristol
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES /SCA /LPMA & Bristol Aerosol Research Center
Tuteur de thèse :	Pascal LEMAITRE
Directeur de thèse :	Jonathan REID – University of Bristol
Financement de thèse :	IRSN

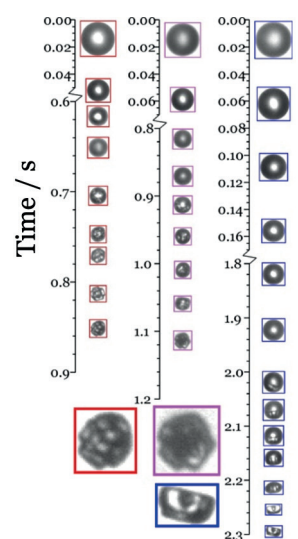
In the nuclear industry, large amounts of radioactive materials are handled in the liquid phase. In the event of an accident aerosol droplets could be produced, these droplets would dry to form solid phase aerosol particles. Parameters governing droplet-drying impact final dry particle morphology which in turn determines the aerodynamic and transport properties of the dry particles. One way to understand the effect of evaporation rate on final morphology is to use a Peclet number,  $Pe$ , show in equation 1. It is essential for the IRSN to understand the transport properties of released particles in order to characterise the transfer of contamination and assess the efficacy of filtration methods.

$$Pe = \frac{\kappa}{8D} \quad (1)$$

There are a limited number of techniques to make measurements on droplets during their evaporative lifetime. Observation of droplets from droplet generation to dry particle formation is rarely achieved and instruments are often limited by the temporal resolution or ability to collect dried particles for further analysis.

This work uses a Falling Droplet Column (FDC), an instrument that allows measurements on a chain of falling droplets, with the capability to observe entire droplet evaporative lifetimes with a sub-microsecond temporal resolution. The FDC enables detailed imaging of droplets, measurements of aerodynamic properties and light scattering properties of particles during the drying process and additional collection of final dry particles for analysis. A chain of uniform falling droplets is established in temperature and humidity controlled environment using a droplet-on-demand dispenser triggered at a regular frequency. Stroboscopic illumination of the same frequency is used to create a standing image of the chain. Each point throughout the stroboscopic pattern is analogous to a point in the droplet lifetime. High time-resolution is achieved by variation of the delay between triggering droplet generation and imaging. Dry particles are deposited at the bottom of the FDC and imaged using SEM. This allows evaporative dynamics to be studied in a range of conditions from initial droplet formation to complete solvent evaporation in conjunction with final morphologies produced.

Figure shows images of the morphology of evaporating NaCl droplets over time in environments of 20% (red), 30% (purple) and 40% relative humidity (blue). Enlarged images of final morphologies are inset.



## SUJET DE LA THÈSE

Remise en suspension particulaire par impact de jet de liquide contaminé  
contre une surface

Doctorant :	Modou MBAYE
Date du début de la thèse :	11 / 10 / 2019
École doctorale :	Institut Polytechnique de Paris/Mécanique des fluides et des solides, acoustique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SCA/LPMA
Tuteur de thèse :	Mamadou SOW
Directeur de thèse :	Christophe JOSSERAND - LadHyX
Financement de thèse :	IRSN

Dans l'industrie nucléaire, une partie de la matière radioactive est manipulée sous forme de liquide. Lors d'un scénario accidentel de déversement de ce liquide, une fraction de la radioactivité peut être mise en suspension via des gouttelettes évaporables. De ce fait, il est important pour l'IRSN de bien caractériser la quantité et la distribution granulométrique des aérosols générés par l'accident. La caractérisation du terme source (aérosols) permet d'anticiper les éventuels rejets atmosphériques et leurs conséquences sur les opérateurs et le public.

L'objectif de cette thèse est d'identifier les mécanismes à l'origine de la remise en suspension particulaire liée à l'impact d'une chute de liquide sous forme de jet et de caractériser la fraction mise en suspension (ratio entre la masse mise en suspension et la masse dispersable) en fonction des paramètres du problème. Les mécanismes en question sont en partie des instabilités de type Rayleigh-Plateau se produisant sur le jet avant l'impact (fragmentation du liquide avant l'impact) et un ressaut hydraulique dû à l'expansion radiale du liquide sur la surface d'impact (emprisonnement de bulles d'air). Pour atteindre ces objectifs, un dispositif de 0,67 m<sup>3</sup> nommé DICAPRIO (Dispositif de Caractérisation des Particules remises en suspension par Impact de jets de liquide et d'Observation) a été développé lors de la première année en se basant sur une étude bibliographique et des essais préliminaires de faisabilité. Une première série de mesures a été réalisée pour déterminer les zones d'intérêt de mesure et vérifier l'homogénéité du mélange dans l'enceinte avec un traçage gazeux en tenant compte de la présence de l'instrumentation dans l'enceinte. Afin d'étudier les instabilités mises en jeu lors de l'impact du jet, une caméra rapide numérique est utilisée. La caméra permet en partie d'analyser la dynamique à l'impact et l'emprisonnement de bulles se produisant dans le ressaut. La fraction d'aérosol mise en suspension est caractérisée avec un traceur fluorescent. Les aérosols sont prélevés sur un filtre avec un taux de renouvellement d'air de 25 h<sup>-1</sup>, puis analysés par spectrofluorimétrie. La granulométrie des aérosols produits par l'impact du jet est caractérisée avec un compteur optique de particules.

Les résultats obtenus avec le compteur optique de particules illustrent bien que l'impact du jet produit des aérosols. De plus, la production d'aérosols est liée à la vitesse du jet. Pour une même quantité de liquide, plus cette dernière augmente, plus la durée de la production est courte. Les données sur la fraction remise en suspension sont en cours d'acquisition.

## SUJET DE LA THÈSE

## Validation des modèles de rétention de la pollution particulaire dans les équipements de réseau de ventilation

Doctorant :	Delphine COSTA
Date du début de la thèse :	05/11/2018
École doctorale :	Université Paris-Est/Sciences, Ingénierie et Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SCA/LEMAC
Tuteur de thèse :	Jeanne MALET
Directeur de thèse :	Jeanne MALET - IRSN
Co-directeur :	Evelyne GEHIN - UPEC
Financement de thèse :	IRSN/UPEC

La caractérisation des transferts de contaminants est une problématique majeure dans la recherche en sûreté à l'IRSN. Quantifier le dépôt d'aérosols dans les réseaux de ventilation est nécessaire dans ce cadre puisque cela permet de mieux caractériser l'accumulation (risque de points chauds) et le rejet (meilleure estimation du terme source à l'environnement) de particules. Pour cela, le réseau de ventilation de taille industrielle et de section rectangulaire DIESE (Dépôt dans les Installations, les Equipements et les Sondes d'Echantillonnage) a été installé au PSN-RES/SCA.

Les travaux réalisés durant cette thèse s'inscrivent dans le programme DEPART (DEpôt de PARTicules) et se focalisent sur le dépôt dans un coude. Ils se répartissent en trois phases.

La première phase a permis d'établir la grille d'essais à réaliser pour la quantification du dépôt dans un coude du banc, d'identifier les paramètres influençant le dépôt d'aérosols et les conditions aérauliques et de choisir la technique de mesure du dépôt.

La seconde phase correspond à la phase expérimentale. Elle comprend la réalisation des essais, durant lesquels le dépôt est quantifié, d'abord sur des tronçons droits en amont et en aval du coude, puis dans le coude lui-même. L'aérosol déposé est récolté directement en paroi grâce à une technique de frottis, couplée à la spectroscopie de fluorescence : après génération d'un aérosol micronique fluorescent, la paroi de la gaine est frottée pour récolter le dépôt d'aérosols, sans modification de la surface de dépôt. Après une analyse chimique, on mesure ainsi un flux de dépôt. Des essais aérauliques permettent également de caractériser les conditions dans lesquelles l'air s'écoule dans le banc et ainsi d'acquérir des données utiles pour les comparaisons avec les calculs CFD menés en parallèle.

Les expériences sont actuellement en cours, après une période de tests assurant la répétabilité du protocole de mesure. Des vitesses de dépôt sont finalement obtenues grâce aux mesures de flux de dépôt et à des mesures de la concentration en gaine. Ces mesures ont été réalisées pour différents diamètres de particules et différentes vitesses d'écoulement. Les premiers résultats obtenus sont cohérents avec la littérature.

La troisième phase comprendra des essais sur des coudes dont les paramètres géométriques seront différents. Par comparaison avec les résultats obtenus en CFD, des corrélations semi-empiriques pourront être obtenues pour le dépôt dans ce type de singularité. Elles pourront être, à terme, utilisées dans SYLVIA, logiciel permettant d'étudier le comportement des réseaux de ventilation en situation normale, dégradée ou accidentelle.



## ➤ Mercredi 31 mars

14h00 - 15h15 La Grande Motte

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ ÉVALUATION DU RISQUE SISMIQUE

**Président : Oona SCOTTI**

Esperta-séniore - Pôle Santé-Environnement

**Fiia-Charlotta NURMINEN** - Probabilistic fault displacement hazard analysis  
– Improved methodology and applications.

**Rihab SASSI** - Modélisation de la rupture spontanée sur des géométries de failles complexes pour étudier l'aléa rupture de surface et le mouvement du sol en champ proche.

**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.

## SUJET DE LA THÈSE

## Probabilistic fault displacement hazard analysis – Improved methodology and applications

Doctorant :	Fiia-Charlotta NURMINEN
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2018
École doctorale :	Université de Chieti, IT / DiSPuTer
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Tuteur de thèse :	Stéphane BAIZE
Directeur de thèse :	Paolo BONCIO - Université de Chieti
Financement de thèse :	IRSN / Université de Chieti

The methodology of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) was developed for estimating the probability of occurrence of surface displacement and exceedance of displacement level during an earthquake at sensitive sites for which even a small probability of a small surface displacement might be crucial. The calculations are based on empirical parameters which have a direct impact on the applicability of the hazard modelling. Thus, within this project, the methodology for obtaining these parameters has been enhanced especially when it comes to the distributed (off-fault) rupturing on dip-slip earthquakes. The new approach and new empirical regression parameters for thrust faulting earthquakes were published recently in *Frontiers in Earth Science* (Nurminen *et al.*, 2020<sup>1</sup>).

The basis of this research project is in the empirical database, and an essential part of the work has been working on the SURE dataset (Baize *et al.*, 2019<sup>2</sup>) especially for the thrust faulting earthquakes. The new, enhanced approach for obtaining the regression parameters was developed focusing on distributed rupturing of reverse earthquakes as those had not yet been covered by the previous studies. The approach has been presented to the scientific community, and it seems a valid way to estimate those factors. Thus, this approach has been applied to normal faulting earthquakes equally.

The next step for finalizing the PFDHA for dip-slip earthquakes will be including the principal faulting (on-fault) parameters into the analysis. Currently, I am evaluating whether to apply an approach developed by another research group dedicated to principal faulting to the database used in this project, or if some adjustments are needed due to the fundamental differences in the approaches. The key difference to the other research projects is the handling of the initial data ; within this project the original field data has been ranked considering the geological structures when known, but this might not be an issue when it comes to the principal faulting.

Naturally the global COVID-19 pandemic has had an influence on this project as well. The research period at IRSN in spring 2020 was interrupted by the lockdown, and I have been working remotely ever since. Thus, the brainstorming and methodological development has been slower than expected due to the less spontaneous interaction within the research group. Also, for the obvious reasons, the planned collaboration with the California Geological Survey in Sacramento during autumn 2020 was postponed.

1. Nurminen F., Boncio P., Visini F., Pace B., Valentini A., Baize S., Scotti O.: Probability of occurrence and Displacement Regression of Distributed Surface Rupturing for Reverse Earthquakes. *Front. Earth Sci.* 8:581605. doi: 10.3389/feart.2020.581605, 2020.
2. Baize, S., Nurminen, F., Sarmiento, A., Dawson, T., Takao, M., Scotti, O., Azuma, T., Boncio, B., Champenois, J., Cinti, F.R., Civico, R., Costa, C., Guerrieri, L., Marti, E., McCalpin, J., Okumura, K., Villamor, P.: A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses, *Seismological Research Letters*, 91 (1): 499-520, 2019.



## SUJET DE LA THÈSE

**Modélisation de la rupture spontanée sur des géométries de failles complexes pour étudier l'aléa rupture de surface et le mouvement du sol en champ proche**

---

Doctorant :	Rihab SASSI
Date du début de la thèse :	05/11/2018
École doctorale :	Sorbonne Université / Sciences de la Terre, de l'Environnement et Physique de l'Univers
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Tuteur de thèse :	Sébastien HOK
Directeur de thèse :	Yann Klinger - IPGP
Financement de thèse :	IRSN / ANR DISRUPT

---

Lors d'un séisme, comme cela s'est produit au Teil le 11 novembre 2019 (Mw 4.9), la croûte terrestre peut rompre jusqu'à la surface. Le déplacement produit sur la faille est alors visible et modifie la surface du sol. Ainsi, la rupture de surface présente une menace pour les infrastructures construites à proximité immédiate des failles actives. Les méthodes d'évaluation de l'aléa « rupture de surface » développées pour des infrastructures américaines et japonaises sont basées sur des modèles empiriques qui simplifient le rôle de la source sismique, et donc restent approximatives. L'introduction des modèles "*physics-based*" dans ces méthodes pourrait permettre à terme de réduire les incertitudes. La problématique s'inscrit dans la démarche de recherche de l'IRSN visant au développement de méthodes fondées sur la modélisation numérique physique pour réduire les incertitudes dans l'estimation de l'aléa sismique, notamment à proximité des failles actives.

Les ruptures de surface montrent une forte complexité : localisation diffuse ou concentrée, ampleur variable. Cette complexité peut être liée à plusieurs paramètres physiques qui contrôlent le processus de la rupture à savoir la contrainte initiale, la résistance à la friction de la faille, les caractéristiques mécaniques de la roche, etc. Elle peut être aussi liée à la géométrie de la faille (branchement, relais de segments, variation de pendage). Essayer de comprendre l'origine de la complexité de la rupture de surface est l'objectif principal de la thèse.

Nous étudions en particulier la rupture de surface associé au séisme du Teil de novembre 2019 (Mw 4.9). Nous modélisons la rupture de la faille à l'aide d'un code numérique 3D s'appuyant sur la méthode des éléments frontières. Nous avons modélisé la propagation de la rupture pendant le séisme du Teil, en considérant plusieurs scénarios possibles, notamment en changeant la géométrie de la faille et/ou quelques paramètres physiques qui contrôlent la propagation de la rupture sur la faille. Les résultats montrent une sensibilité de la rupture de surface à la géométrie de la faille ainsi qu'à certains paramètres frictionnels. La présence d'une faille secondaire dans le milieu de propagation peut augmenter ou diminuer la quantité de déplacement de la surface. Cette variation dépend de l'orientation de la faille secondaire ainsi et du processus de la rupture sur les deux failles. Nos résultats théoriques sont comparés avec les données de rupture de surface afin de vérifier leur validité.

## 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**

Doctorant :	Marion BAQUES
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2019
École doctorale :	Université de la Côte d'Azur / Sciences fondamentales et appliquées
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN & Observatoire de la Côte d'Azur
Tuteur de thèse :	Hervé JOMARD
Directeur de thèse :	Louis DE BARROS - Université Côte d'Azur
Co-Directeur :	Maxime GODANO - Université Côte d'Azur
Financement de thèse :	IRSN / CEA

La région de l'Ubaye est l'une des zones les plus sismiquement actives des Alpes françaises. Depuis les années 1950, plus d'une dizaine de séismes de magnitudes supérieures à 4 s'y sont produits, certains ayant été ressenti à plus de 200km de l'épicentre et causant des dégâts dans les villes les plus proches. Deux comportements d'activité sismique différents sont souvent observés dans la zone, parfois en même temps : des séquences classiques (un séisme principal suivi par une succession de répliques moins fortes) et des essaims de séismes (succession de petits séismes sans séisme majeur pouvant durer quelques heures comme plusieurs mois).

Cette dualité implique la contribution de différents processus de déformation qui génèrent la sismicité et peuvent avoir un impact sur la détermination de 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 se concentre dans un premier temps sur cette problématique « processus », abordée à partir de l'analyse fine de la sismicité enregistrée pendant la crise de 2014. L'analyse de la sismicité sur période antérieure (instrumentale et historique) sera développée dans un deuxième temps, de même que les implications pour l'aléa sismique. Un article de synthèse bibliographique sur la zone de l'Ubaye est en cours de finalisation.

Les résultats obtenus lors de cette première année de thèse concernent :

- La détermination des mécanismes au foyer des séismes (défini deux plans potentiels de faille, appelés « plans nodaux »). Sur les 99 mécanismes obtenus, 64 n'ont aucun plan nodal compatible avec les alignements de sismicité observés. Cela pourrait impliquer que ces alignements modélisés en 3D ne matérialisent pas nécessairement des plans de failles ou bien qu'ils sont mal contraints et doivent être redéfinis avec des critères plus stricts.
- Le calcul de l'état de contraintes local au niveau de l'essaim à partir des mécanismes au foyer et de celui régional pour l'Ubaye. Ces états de contraintes sont cohérents entre eux et cohérents avec ceux déjà publiés dans la zone.
- Le développement d'une nouvelle méthode pour calculer les surpressions de fluides nécessaires à la rupture en fonction de l'orientation des plans nodaux. Sur l'ensemble de mes plans de failles, de 0 à 50 MPa de surpression de fluides sont nécessaires pour expliquer la rupture. Cela implique une réflexion sur la mise en pression de ces fluides en profondeur ainsi que de leur provenance.

## SUJET DE LA THÈSE

## Le signal sédimentaire comme élément de caractérisation de l'activité sismique au front des Alpes

Doctorant :	Mathilde BANJAN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Université Savoie-Mont-Blanc / Terre-Univers-Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN & IsTerre Chambéry
Tuteur de thèse :	Hervé JOMARD
Directeur de thèse :	Christian CROUZET - IsTerre
Co-directeur :	Erwan MESSAGER - EDYTEM
Financement de thèse :	IRSN / USMB

Les catalogues de sismicité historiques et instrumentaux permettent-ils d'évaluer le temps de retour d'événements majeurs pour appréhender l'aléa sismique à l'échelle régionale ?

Les archives sédimentaires lacustres sont des enregistreurs de la récurrence de l'activité sismique. A ce jour, aucune étude sédimentaire n'a été effectuée à haute résolution temporelle. Dans le cadre des recherches menées par l'IRSN pour la caractérisation des sources géologiques contrôlant l'aléa sismique, mon objectif est d'établir une chronique événementielle pour mieux appréhender l'occurrence d'événements sismiques majeurs à longue période de retour au front des Alpes.

Deux séquences sédimentaires ont été prélevées dans le lac d'Aiguebelette (Savoie), situé dans une zone sismiquement active. La sédimentation y est varvée (saisonnnière) et couvre la période Holocène (~ 12 000 ans), ce qui est unique à ce jour dans les Alpes.

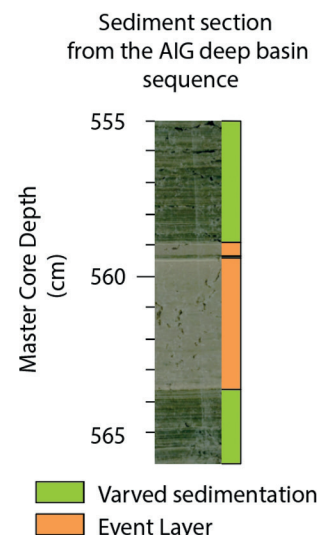
Nous suivons le programme suivant :

- Analyses multi-proxy permettant une identification quantitative des dépôts événementiels (DE) intercalés dans la sédimentation continue et contrainte temporellement (datations radiocarbone).
- Création d'une chronique des DE calée sur les datations et les données hyperspectrales permettant un comptage de varves (annuel à saisonnier) automatisé.
- Comparaison de la chronique établie avec la base de données Sisfrance. Utilisation de l'enregistrement des variations séculaires du champ magnétique terrestre pour affiner la chronologie des dépôts.
- Estimation de la source, du volume déplacé et de l'énergie nécessaire à un DE majeur.

A ce jour, 33 DE (type homogénite) sont identifiés et caractérisés quantitativement par : une foliation élevée de l'anisotropie de susceptibilité magnétique (>2%) et de faibles amplitudes de champs ( $\leq 0.4 \mu\text{T}$ ) - IRM induit). Ces dépôts sont généralement associés à l'effet de seiche dans la colonne d'eau, induit par un séisme. Les données multi-proxy suggèrent une minéralogie différente dans ces dépôts.

L'écriture d'un article est en cours : " *Did the Late Glacial to Holocene climatic transition (LGH) trigger large earthquakes in the Western Alps?*", centré sur les analyses d'un DE métrique daté à  $11400 \pm 300$  cal. BP et identifié sur les profils sismiques haute résolution. L'impact climatique sur l'activité sismique et sur l'estimation de l'aléa est discuté.

Les difficultés rencontrées sont liées à la crise sanitaire : la majeure partie des analyses furent planifiées pendant le confinement et repoussées de 3 mois. Certaines, nécessaires à la chronique événementielle sont toujours en attente et impliqueront un changement du modèle d'âge actuel. Un retard global sur le planning initial est estimé entre 4 et 5 mois.





## ➤ Mercredi 31 mars

15h40 - 17h00 L'auditorium

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ DÉVELOPPEMENT DE SCHÉMAS DE CALCUL ET DE SCHÉMAS NUMÉRIQUES POUR L'ÉVALUATION DE LA SURETÉ ET DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

**Présidente : Ludyvine JUTIER**

Chargée de mission "partenariat" - Direction de la stratégie

**Romain VUIART** - Mise au point d'un schéma de calcul pour la quantification de la fluence neutronique vue par la cuve au cours du fonctionnement d'un réacteur de puissance à eau pressurisée.

**Kévin FRÖHLICHER** - Modélisation hybride Déterministe / Monte Carlo pour l'optimisation de calculs de transitoires de puissance en cinétique espace-temps.

**Robert CAULK** - Modeling the transience of partial saturation and cracks in heterogeneous swelling clays using the Discrete Element and Finite Volume methods.

**Abdellah AMRI** - Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs.

## SUJET DE LA THÈSE

Mise au point d'un schéma de calcul pour la quantification de la fluence neutronique vue par la cuve au cours du fonctionnement d'un réacteur de puissance à eau pressurisée

Doctorant :	Romain VUIART
Date du début de la thèse :	08 / 10 / 2018
École doctorale :	Université de Paris-Saclay / PHENIICS
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SNC/LN
Tuteur de thèse :	Mariya BROVCHENKO / Julien TAFORÉAU
Directeur de thèse :	Éric DUMONTEIL - CEA / IRFU
Financement de thèse :	IRSN

---

L'étude du vieillissement de la cuve est une composante importante de l'analyse de sûreté associée à la prolongation de la durée de vie des réacteurs du parc français. En effet la cuve ne peut être remplacée, et constitue à ce titre un des composants limitant la durée de vie du réacteur. L'endommagement de la cuve est lié à l'irradiation sous flux neutronique rapide ( $E > 1$  MeV) qui peut causer des dommages dans la structure des matériaux qui la compose. De fait, la fluence (flux intégré au cours du temps) neutronique rapide, est un des paramètres permettant d'estimer le vieillissement de la cuve. L'objectif de cette thèse consiste à développer une méthodologie permettant de réaliser des calculs individualisés (c'est-à-dire lié à un historique d'irradiation particulier) de la fluence neutronique (rapide et non rapide) ainsi que les déplacements par atome (dpa) dans la cuve des réacteurs ou dans les capsules du Programme de Surveillance de l'Irradiation (PSI). Ces dernières sont utilisées pour quantifier a priori l'évolution des propriétés mécaniques de la cuve en fonction de l'irradiation neutronique rapide subie.

Le travail de première année de thèse a eu pour objectif d'étudier les différents paramètres qui varient pendant le fonctionnement du réacteur afin d'évaluer leurs impacts respectifs sur une évaluation de fluence cuve. Les paramètres ayant un impact significatif (niveau de puissance du réacteur, concentration de bore et insertion des barres de contrôle) sont ensuite utilisés en entrée d'un schéma de calcul permettant d'effectuer des études de vieillissement le plus précisément possible tout en gardant un temps de calcul raisonnable.

Le développement de cette méthodologie de calcul a constitué le principal axe de travail de la deuxième année de thèse. Le schéma de calcul retenu est constitué de deux étapes : une première consistant à évaluer la répartition spatiale et énergétique des neutrons dans le cœur et une seconde qui consiste à atténuer les neutrons sources émis jusqu'à la cuve.

Une fois cette méthodologie fixée, le travail de seconde année de thèse a permis d'étendre les prédictions du modèle à une autre observable d'intérêt : les dpa ; ainsi qu'à une autre localisation d'intérêt dans le réacteur : les capsules du PSI. Ces nouvelles possibilités seront utilisées en troisième année pour effectuer une étude comparative du vieillissement de la cuve des réacteurs à eau pressurisée au regard de celui des capsules du PSI. Enfin, un benchmark de validation de la méthodologie développée sera réalisé.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation hybride Déterministe / Monte Carlo pour l'optimisation de calculs  
de transitoires de puissance en cinétique espace-temps

Doctorant :	Kévin FRÖHLICHER
Date du début de la thèse :	14 / 10 / 2019
École doctorale :	Université Paris-Saclay / PHENIICS
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SNC/LN
Tuteur de thèse :	Julien TAFOREAU / Mariya BROVCHENKO
Directeur de thèse :	Eric DUMONTEIL - CEA / IRFU
Co-directeur :	Alain HÉBERT - Polytechnique Montréal
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre de ses activités de recherche, le laboratoire de neutronique 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 calculs Monte Carlo dynamiques à l'aide de méthodes déterministes.

Le principe du 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 sur les histoires les plus importantes. Ainsi, les neutrons les plus « importants » 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, il s'agit d'implémenter la méthode dans un code simplifié afin d'établir une preuve de principe. En parallèle, les codes déterministes doivent être adaptés pour prendre en compte l'aspect temporel dans le calcul de l'importance. *In fine*, il s'agira d'utiliser une carte d'importance temporelle avec une méthode déterministe (rapide) afin d'accélérer la convergence du calcul Monte Carlo (précis) pour des cas plus complexes.

La première difficulté rencontrée au cours de la première année de thèse concerne le choix de la méthode d'accélération. Il a été nécessaire de comparer les méthodes existantes, pour choisir une voie à explorer. Une nouvelle méthode est envisagée, il reste encore à l'implémenter et la valider. Enfin, le calcul de l'importance des particules a nécessité de s'attarder sur la notion de flux adjoint. Relativement bien documenté pour des problèmes statiques, le flux adjoint temporel est encore trop peu utilisé. Il a fallu caractériser cette notion pour des problèmes temporels, puis dériver les équations nécessaires. Pour la suite de la thèse, il conviendra de modifier et valider les outils déterministes pour obtenir une carte d'importance utilisable par notre méthode Monte Carlo.

## SUJET DE LA THÈSE

### Modeling the transience of partial saturation and cracks in heterogeneous swelling clays using the Discrete Element and Finite Volume methods

Doctorant :	Robert CAULK
Date du début de la thèse :	13 / 01 / 2020
École doctorale :	Université de Grenoble / I-MEP2 3S-R
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS & UMR-3SR
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	BRUNO CHAREYRE – CNRS / UMR-3SR
Financement de thèse :	IRSN / CCSN

---

Vertical sealing systems for deep geological disposals are considered as key elements for the long term safety, since they constitute the main potential pathway between nuclear wastes and biosphere. One of the candidate materials for these vertical seals consists in a mixture of swelling clays (Na-montmorillonite) in the form of a polydisperse assembly of highly compacted pellets and crushed pellets in a strongly desaturated initial state ( $> 100\text{MPa}$ ). Since the behaviour of these highly compacted pellets, during anisotropic imbibition, contributes significantly to gas migration processes, the Institute of Radiation Protection and Nuclear Safety (IRSN) initiated in-situ and laboratory experiments aiming at understanding the evolution of MX80 clay pellet structure during combined hydraulic-gas loading. X-ray microtomography and CT observations reveal the development of intricate crack patterns due to vapour transport and free swelling (Molinero, 2018). The present work approaches the problem numerically in an effort to further elucidate the complex behaviour of the multi-scale clay pellet material during asymmetric hydraulic and gas loadings. A novel numerical method is presented for modeling hydration, swelling, and crack developments in heterogeneous compacted clay. The proposed method combines the Discrete Element Method (DEM) with the Finite Volume method (FVM) to simulate the mechanical and hydraulic behavior of a partially saturated swelling clay medium such as bentonite. Within the framework, DEM points are triangulated for FVM to solve the transient partial saturation field. The FVM triangulation is initialized with XRay CT scan imagery to form a heterogeneous field of water retention properties. The initial heterogeneity yields the development of cracks during hydration, which increases gas permeability at 65% saturation and block fluid flux until water entry pressure is met, at which point hydraulic permeability increases with saturation. A convergence study is presented for the DEM point density and demonstrates that 150k DEM points produces accurate results. A multi-scale investigation of the same specimen demonstrates the influence of heterogeneities at a sub-volume of  $0.220\text{ mm}^3$ . With application toward engineered barriers, the permeability of the numerical specimen is measured under unconfined and partially confined conditions to generate an expected range of values for field scale applications. The model demonstrates the reduced gas permeability along the axis of clay compaction due to the anisotropic crack fabric.



## SUJET DE LA THÈSE

### Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs

Doctorant :	Abdellah AMRI
Date du début de la thèse :	02 / 10 / 2018
Ecole doctorale :	INP TOULOUSE / SDU2E
Laboratoire d'accueil :	PSE / ENV / SEDRE / UEMIS
Tuteur de thèse :	Zakaria SAADI
Directeur de thèse :	Rachid ABABOU - IMFT
Financement de thèse :	IRSN / projet européen EURAD

Au voisinage d'un site de stockage géologique profond des déchets radioactifs, des gaz, et essentiellement de l'hydrogène sont générés par la corrosion anaérobie des composantes en acier des colis et par la radiolyse de l'eau. Lorsque la pression du gaz augmente, une phase gazeuse peut être formée jusqu'au dépassement du seuil de la pression d'entrée du gaz ( $P_e$ ), où un écoulement diphasique aura lieu, ce qui peut créer des perturbations hydromécaniques, et diminuer l'efficacité de confinement du stockage.

Afin d'évaluer la sûreté d'une telle installation, l'IRSN a mené plusieurs travaux de recherche pour la modélisation de l'évolution du stockage. Cette thèse a pour objectif d'améliorer les connaissances sur la migration de gaz dans un site de stockage de déchets radioactifs, en introduisant certains phénomènes physiques négligés auparavant dans les modèles de migration des gaz à différentes échelles spatiales. Il s'agit essentiellement de la pression d'entrée du gaz, l'hystérésis dans les courbes de rétention et de perméabilités relatives au gaz et au liquide, l'effet de la pression capillaire sur la solubilité/évaporation des gaz, la dépendance du terme source en la saturation en eau, et le couplage hydromécanique. Selon l'importance de chacun de ces phénomènes, celui-ci sera implémenté dans la plateforme du code massivement parallélisé TOUGH2-MP (LBNL, Berkeley, USA).

A ce stade de la thèse seuls les deux premiers phénomènes ont été étudiés. L'effet de la pression d'entrée du gaz a été pris en compte par une nouvelle approche de traitement des données expérimentales. Dans une première étape, le modèle de Van-Genuchten-Mualem (VGM) modifié a été généralisé pour un écoulement diphasique liquide-gaz et implémenté dans le code RETC pour l'ajustement simultané des propriétés hydrauliques de l'argile du Callovo-Oxfordien (COx; roche hôte du site de stockage CIGEO proposé par l'ANDRA). L'implémentation du nouveau modèle a nécessité le changement des variables primaires dans le code TOUGH2. Après des tests de vérification numérique de cette nouvelle version du code, l'expérience in-situ PGZ1 d'injection de gaz dans l'argile du COx, réalisée au laboratoire souterrain de l'ANDRA à Bure (La Meuse/Haute-Marne), a été modélisée. Les résultats préliminaires confirment qu'une pression d'entrée de gaz non nulle ( $P_e \neq 0$ ) conduit à des pressions plus élevées que celles simulées avec le modèle classique de VGM ( $P_e = 0$ ). Cette nouvelle approche sera généralisée à d'autres matériaux de barrières ouvragées en prenant en compte l'hystérésis, cela afin de réaliser des simulations à l'échelle d'un module du site de stockage.

#### Références bibliographiques

Amri A., Z. Saâdi, R. Ababou, M. Dymitrowska (2020): Parametric sensitivity to gas-entry pressure in 2-phase flow models in a deep geologic repository for radioactive waste. 8th Internat. Conf. on Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement (8-11 June 2020, Nancy, France). Extended abstract [Accepted, Oct. 2019].



## ➤ Mercredi 31 mars

15h40 - 17h00 La Grande Motte

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ COMPORTEMENT DE L'ACIER

**Président : Gauzelin BARBIER**

Chargé de mission auprès du Directeur de la recherche en sûreté

**Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU** - Étude de la production d'hydrogène moléculaire par la corrosion anoxique des aciers sous irradiation gamma.

**Arnaud ALLERA** - Modélisation multi-échelles de la plasticité dans les aciers fer-carbone.

**Aya RIMA** - Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil des installations nucléaires françaises.

## SUJET DE LA THÈSE

## Étude de la production d'hydrogène moléculaire par la corrosion anoxique des aciers sous irradiation gamma

Doctorant :	Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU
Date du début de la thèse :	15/10/2018
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Sciences chimiques : molécules, Matériaux, instrumentation et biosystèmes
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SCA/LECEV
Tuteur de thèse :	Hortense DESJONQUERES / Charles WITTEBROODT
Directeur de thèse :	Gérard BALDACCHINO-CEA
Financement de thèse :	IRSN

En France, le stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde est étudié en vue d'isoler les déchets HA-MAVL. Après la fermeture du stockage, la corrosion anaérobie des éléments métalliques utilisés provoquera un dégagement d'hydrogène gazeux. Simultanément, les rayonnements ionisants émis par certains déchets conduiront à la radiolyse de l'eau présente dans la roche. Cette dernière réaction entraînera une production d'hydrogène gazeux supplémentaire et la création d'espèces oxydo-réductrices susceptibles de modifier les conditions chimiques du milieu et les processus de corrosion.

Cette thèse a pour objectif l'acquisition de nouvelles données expérimentales relatives à la corrosion anoxique d'un acier carbone sous irradiation gamma, et à la production d'hydrogène associée. Une cellule contenant des échantillons métalliques immergés dans une solution désaérée (eau pure, eau argileuse synthétique) est exposée au rayonnement gamma ( $^{60}\text{Co}$ ), et la production d'hydrogène est mesurée en continu (chromatographie en phase gazeuse) durant différentes phases (corrosion pure, corrosion sous irradiation, corrosion post-irradiation). Le suivi de la production d'hydrogène en fonction du temps nous renseigne sur les vitesses de corrosion caractéristiques de ces différentes phases. La surface des échantillons est ensuite caractérisée (microscopie optique, MEB,  $\mu\text{Raman}$ ) pour identifier les produits de corrosion formés. Les caractéristiques chimiques de la solution (pH, fer dissous,  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ) sont également déterminées afin d'étudier les processus de corrosion.

Les expériences réalisées avec l'eau pure ont permis d'acquérir, pour les trois différentes phases, l'évolution de la production d'hydrogène, validant ainsi notre montage expérimental. Néanmoins, la mesure par chromatographie en phase gazeuse a demandé beaucoup d'efforts et de nombreux tests visant à vérifier la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus ont été réalisés. Au cours de l'irradiation, la production d'hydrogène est principalement liée aux mécanismes de radiolyse de l'eau. Durant cette phase, on observe une légère diminution de la production d'hydrogène au cours du temps qui peut être due à la formation de peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), espèce radiolytique capable de capturer les électrons hydratés à l'origine d'une partie de la production d'hydrogène. Le principal produit de corrosion est la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et les analyses chimiques mettent en évidence sa dissolution partielle. L'utilisation d'une solution synthétique argileuse semble indiquer que la composition chimique impacte peu les valeurs de production d'hydrogène et implique la formation de magnétite et de maghémite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Enfin, les modélisations du phénomène de radiolyse de l'eau réalisées *via* le code ChemSimul n'ont pour l'instant pas pu être corrélées aux valeurs expérimentales obtenues.

## SUJET DE LA THÈSE

## Modélisation multi-échelles de la plasticité dans les aciers fer-carbone

Doctorant :	Arnaud ALLERA
Date du début de la thèse :	08 / 10 / 2018
École doctorale :	Université Lyon I / Physique Astrophysique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/ SEMIA/ LPTM
Tuteur de thèse :	Fabienne RIBEIRO
Directeur de thèse :	David RODNEY - ILM Univ. Lyon
Co-directeur :	Michel PEREZ - Mateis INSA Lyon
Financement de thèse :	IRSN

En service, les cuves de réacteurs à eau pressurisée (REP) en acier ferritique sont soumises à des conditions extrêmes (300°C, 155 bar, irradiation,...) qui peuvent dégrader leurs propriétés. Elles subissent notamment un durcissement et une fragilisation, susceptibles d'avoir un impact sur la sûreté, qui sont dus à une évolution microstructurale.

Au cours du temps, les atomes de carbone présents dans l'acier de la cuve migrent vers les dislocations et forment des « atmosphères de Cottrell »<sup>1</sup> qui en bloquent le mouvement par un mécanisme encore mal compris. L'objectif de cette étude est de caractériser la mobilité des dislocations dans le fer cubique centré, lorsqu'elles interagissent avec ces atmosphères. Pour cela, il est nécessaire de combiner des calculs à différentes échelles : *ab initio*, simulations atomistiques (Dynamique Moléculaire), et Monte Carlo Cinétique.

A l'échelle atomique, les interactions entre atomes peuvent être calculées de façon simplifiée à l'aide d'un potentiel empirique. La précision des potentiels disponibles étant limitante pour cette étude, nous avons mis au point un potentiel d'interaction hybride, offrant une meilleure description des propriétés des dislocations dans fer-carbone, sur la base des deux potentiels les plus performants<sup>2,3</sup>.

L'utilisation de ce potentiel a permis d'examiner en détail l'ancrage des dislocations par une solution solide de carbone via des simulations atomistiques, et de relier l'environnement d'une dislocation à sa mobilité. Ces simulations montrent un fort effet ancrant des atomes de carbone lorsqu'ils sont proches, associé une perturbation locale du paysage énergétique de la dislocation.

Ces résultats permettent de caractériser les événements élémentaires de la déformation plastique, que nous intégrons désormais à un modèle Monte Carlo Cinétique permettant la prise en compte des effets de diffusion du carbone aux temps longs. La mise au point de ce modèle permettra de dégager une loi de mobilité des dislocations au cours du vieillissement, utile pour se tourner vers les échelles supérieures.

1. O. Waseda, et al. Scripta Mater. 129 (2017)

2. Veiga, R. G., Becquart, C. S., & Perez, M. Comput. Materials Science, 82 (2014)

3. Proville, L., Rodney, D., & Marinica, M. C. Nature materials, 11 (2012)

## SUJET DE LA THÈSE

Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil  
des installations nucléaires françaises

---

Doctorant :	Aya RIMA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Université Paris-Saclay / SMEMaG
Laboratoire d'accueil :	PSN-EXP / SES / BEGC & Laboratoire de Mécanique et Technologie
Tuteur de thèse :	Marie-Hélène BONHOMME / Georges NAHAS
Directeur de thèse :	Frédéric RAGUENEAU - ENS Paris-Saclay
Financement de thèse :	IRSN / CSTB

---

Les systèmes de fixations assurent la liaison au génie civil de nombreux matériels et équipements importants pour la protection des intérêts. Le rôle de l'ancrage est d'assurer la transmission des efforts entre l'équipement et sa structure support. Il doit notamment assurer un supportage adéquat des équipements en cas de chargement sismique. Or le retour d'expérience post sismique montre que les ancrages sont un point sensible vis-à-vis du comportement sismique des matériels. Aussi un mauvais choix de ces ancrages aurait des conséquences désastreuses comportant des risques pour la sûreté des installations. La notion de qualification au séisme des ancrages est assez récente. En plus, la plupart des chevilles présentes sur le parc nucléaire français, à l'exception des chevilles mises en place ces dernières années, ne sont pas qualifiées pour les charges sismiques et le sont uniquement pour les charges statiques et quasi-statiques. Des essais réalisés au CSTB sur des ancrages non qualifiés au séisme montrent que la capacité résistante des ancrages sous sollicitations sismiques, surtout en cisaillement, est relativement plus faible que celle sous chargement statique.

De ce fait, l'évaluation du comportement des ancrages existants sous chargement sismique représente un enjeu majeur pour la sûreté.

L'approche scientifique retenue consiste à utiliser deux modélisations pour évaluer le comportement des fixations sous chargement sismique. À l'échelle des ancrages, la fissuration du support en béton sera explicitement décrite par un modèle d'éléments discrets et à l'échelle de la structure, un modèle simplifié utilisant des variables généralisées sera développé pour représenter le comportement non-linéaire des ancrages (les paramètres à l'échelle macroscopique seront définis par un modèle d'éléments discrets).

Pour pouvoir vérifier la démarche en particulier le modèle d'éléments discrets, des essais d'arrachement d'un ancrage simplifié de type goujon ont été réalisés au CSTB. La modélisation de ces essais a permis de consolider la démarche et préparer le modèle pour prédire le comportement des fixations de type goujon sous différents types de chargement. Une méthode simplifiée de détection du contact entre l'ancrage et le béton a été mise en œuvre pour pouvoir étudier le comportement de ces ancrages. Les simulations sont réalisées en analyse 3D sur des goujons à tête hexagonale percés dans le béton. Les résultats numériques obtenus ont été comparés avec les données expérimentales. Ils serviront ultérieurement pour la définition des paramètres du macro élément. La discussion porte actuellement sur la capacité de généraliser ce modèle d'éléments discrets pour prédire le comportement des autres types d'ancrages.

## ➤ Mercredi 31 mars

17h20 - 18h20 L'auditorium

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

**Président : Christophe DEBAYLE**

Adjoint au chef de service - PSE-ENV/SEDRE

**Adrien DELAVAL** - Modélisation du Transfert des Radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer.

**Sarah ZAMANE** - Validité temporelle des paramètres de rétention des radionucléides dans les sols.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation du Transfert des Radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer

---

Doctorant :	Adrien DELAVAL
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Géosciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Tuteur de thèse :	Céline DUFFA
Directeur de thèse :	Olivier RADAKOVITCH - IRSN
Financement de thèse :	IRSN / Région PACA

---

Le Rhône constitue une source importante de radionucléides (RN) anthropiques à la Mer Méditerranée.

La contamination accidentelle d'un fleuve nucléarisé, est un risque qu'il s'agit d'être en mesure de caractériser et de maîtriser au mieux, notamment à l'aide de modèles numériques prédisant la dispersion des radionucléides en milieu continental et marin en situation accidentelle.

L'IRSN dispose des logiciels CASTEAUR et STERNE pour modéliser les transferts 1D en milieu fluvial et 3D en milieu marin. Pour les RN transitant dans l'eau le couplage des deux modèles représente un atout significatif, mais la compréhension des transferts dans la zone réactionnelle que constitue l'interface fleuve-mer est capitale. Un problème à cet interface estuarien concerne les échanges d'eau et temps de résidence qui sont peu maîtrisés. Pour les nombreux RN qui se déplacent sous forme adsorbée sur les particules en suspension, la question à traiter est la représentation du processus de désorption, qui se produit à l'embouchure quand le milieu s'enrichit en cations (Na, K...) avec la salinité, et que les RN faiblement adsorbés ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,...) peuvent être échangés par échange cationique.

La thèse développe une approche modèle-terrain pour aboutir à une modélisation réaliste du transfert de radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer, plus précisément le *continuum* Rhône-méditerranée.

Les étapes clés sont la modélisation des transferts d'espèces dissoutes dans le Rhône et son estuaire en utilisant les données géomorphologiques du fleuve et de son delta. Des expérimentations en laboratoire ont été réalisées pour évaluer l'effet de la désorption sur les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  dissous. Ces données permettent de considérer la désorption et les conditions aux limites côtières pour assurer la cohérence en termes de données entrée-sortie pour les deux modèles utilisés.

Notre revue bibliographique a montré que la désorption du Cs en eau saumâtre est rapide ( $\approx 1$  h) et qu'une faible salinité ( $\approx 3$ ) est suffisante pour amorcer le processus. La fraction de  $^{137}\text{Cs}$  désorbée est très variable (0-85%) et dépendrait du temps de sorption en amont. Des expériences de laboratoire plus récentes ont confirmé ces hypothèses.

Un "*box model*" interface désormais CASTEAUR et STERNE en modélisant les échanges dans l'estuaire et la désorption du Cs.

En parallèle à ces travaux, l'utilisation d'un algorithme de *Machine Learning* sur 10 ans de données hydrodynamiques à l'embouchure du Rhône (vent, débit) combiné au code STERNE a permis d'identifier 6 climatologies avec des conséquences différentes sur les extensions du panache. Ceci nous a permis de simuler le devenir d'un rejet de Cs dissous du Rhône au Golfe du Lion avec ces 6 scénarios réalistes.



## SUJET DE LA THÈSE

## Validité temporelle des paramètres de rétention des radionucléides dans les sols

---

Doctorant :	Sarah ZAMANE
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LR2T
Tuteur de thèse :	Frédéric COPPIN
Directeur de thèse :	Jérôme ROSE - CEREGE
Financement de thèse :	IRSN

---

Dans les modèles opérationnels, la distribution des radionucléides (RNs) dans le système sol/solution du sol est souvent estimée en utilisant un coefficient de partage (Kd) supposé à l'équilibre et constant dans le temps, reliant la concentration totale du RN dans la fraction solide du sol à celle présente en solution. Plusieurs études montrent une stabilisation avec le temps des RNs dans la fraction solide qui peut varier en fonction du substrat et de la nature de la contamination. L'objectif de la thèse est d'étudier pour 4 sols de natures contrastées l'évolution dans le temps de la distribution solide/liquide de trois éléments (Cs, I, U) ayant des comportements différents afin de vérifier la validité des modèles opérationnels et le cas échéant de proposer une modélisation plus adaptée.

Pour cela, les sols seront contaminés par le cocktail de RNs ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{233}\text{U}$ ) apporté sous forme aqueuse, ou *via* des végétaux contaminés, puis incubés à minima 18 mois. Des prélèvements ponctuels permettront de suivre l'évolution de la distribution entre les phases solide et liquide (extractions successives) et au sein de la phase solide (extractions chimiques séquentielles) des RNs fraîchement ajoutés et de leurs analogues endogènes. Pour expliciter les éventuelles variations observées la dégradation de la matière organique et l'évolution des communautés microbiennes seront en particuliers suivies.

Durant cette première année, le choix des végétaux et le développement du protocole de contamination ont été effectués. De même, le dimensionnement de l'expérimentation d'incubation des sols et l'optimisation du dosage analytique des 6 isotopes étudiés ( $^{133/137}\text{Cs}$ ,  $^{127/129}\text{I}$ ,  $^{238/233}\text{U}$ ) ont été réalisés. Une expérience préliminaire visant à quantifier les niveaux de désorption des différents éléments endogènes pour les 4 sols étudiés a permis de voir que le  $^{133}\text{Cs}$  et le  $^{238}\text{U}$  sont fortement retenus (quantités extraites inférieures respectivement à 0,5% et de 0,08 à 1%) et que l'iode est l'élément le plus mobile (quantité extraite de 2 à 9%). Les extractions chimiques séquentielles nous indiquent que l'iode et l'uranium se retrouvent principalement liés à la matière organique et aux oxydes métalliques alors que le césium est principalement lié à la fraction échangeable et associé aux oxydes pour deux des quatre sols étudiés et principalement lié à la matière organique pour les deux autres sols. La validation finale du dimensionnement choisi à partir de ces résultats sera effectuée à la suite d'une nouvelle expérimentation de sorption/désorption impliquant les RNs; la contamination et l'incubation des sols démarreront au cours du 1<sup>er</sup> trimestre 2021.



## ➤ Mercredi 31 mars

17h20 - 18h20 La Grande Motte

### SESSION PARALLÈLE

#### ➤ MOBILISATION DE LA CLASSIFICATION DES CONNAISSANCES POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES

**Président: Patrice BUESO**

Directeur de la stratégie

**Nicolas DECHY** - Des leçons à apprendre des accidents à l'utilisation d'une nouvelle connaissance et culture des accidents.

**Hugues DELATTRE** - Vents extrêmes et exceptionnels - Caractérisation, Modélisation et Projection future.

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

SUJET DE LA THÈSE

Des leçons à apprendre des accidents à l'utilisation d'une nouvelle connaissance  
et culture des accidents

Doctorant :	Nicolas DECHY
Date du début de la thèse :	20 / 03 / 2018
École doctorale :	Université Bretagne Loire / Sciences Économiques et sciences De Gestion
Laboratoire d'accueil :	PSN-EXP / SHOT / BFOH
Tuteur de thèse :	Alexandre LARGIER
Directeur de thèse :	Benoît JOURNE - Université de Nantes
Financement de thèse :	IRSN

La thèse s'appuie sur le constat que l'analyse des accidents industriels permet d'observer une récurrence des causes profondes quels que soient les secteurs industriels, les époques et les cultures. Ce constat empirique ouvre ainsi sur l'opportunité d'une capitalisation d'un stock de « connaissance des accidents » (Dechy *et al*, 2010<sup>1</sup>).

Ce stock de connaissances des accidents est-il constitué et disponible ? Comment est-il mobilisé pour la prévention des accidents ? Quels sont les écueils et les leviers pour le mobiliser ?

L'objectif principal de la thèse porte sur l'enjeu opérationnel de la mobilisation de ces connaissances dans le cadre de l'expertise de sûreté consistant à évaluer le management de la sûreté.

Au préalable, il convient de revenir sur les fondements théoriques et pratiques du travail de capitalisation et codification de sources d'enseignements des accidents, les connaissances des accidents produites par différentes catégories d'acteurs. Cette analyse critique du concept proposé est effectuée par une revue de littérature scientifique dans le domaine de la sécurité industrielle et des accidents, en sciences de gestion sur l'apprentissage organisationnel des défaillances, et par la réalisation d'entretiens avec des producteurs de cette connaissance, au programme de l'année 2021.

La recherche se concentre sur les pratiques mises en œuvre par les experts de sûreté nucléaire de l'IRSN, et ouvre ensuite sur les dispositifs de gestion pour faciliter la mobilisation des connaissances des accidents et leur utilisation.

Une étude de cas « a-théorique » a ainsi été engagée de 2018 à 2019 pour mettre à jour des processus de mobilisation de cette connaissance dans la pratique d'expertise à l'IRSN. Elle concerne l'instruction du management de la sûreté et de la radioprotection en arrêt de tranche présentée devant le Groupe permanent d'experts en charge des réacteurs à eau sous pression (GPR) en juin 2013. Les connaissances des accidents ont été mobilisées par les experts facteurs organisationnels et humains au travers de plusieurs pratiques, pour cadrer l'expertise, interpréter les données, fonder les conclusions, ainsi que pour convaincre les membres du GPR.

La mise en discussion des résultats empiriques avec le cadre théorique défini en 2020 est, avec la rédaction de thèse, au programme de 2021. Le cadre théorique dans le domaine des sciences de gestion s'appuie sur des théories qui permettent d'aborder les connaissances dans l'action et l'activité de ceux qui construisent l'évaluation et la gestion des risques.

1. Dechy, N., Dien, Y., Llory M. (2010), Pour une culture des accidents au service de la sécurité industrielle, congrès λμ 17 de l'IMdR, La Rochelle, 5-7 Octobre.

## SUJET DE LA THÈSE

## Vents extrêmes et exceptionnels - Caractérisation, Modélisation et Projection future

Doctorant :	Hugues DELATTRE
Date du début de la thèse :	02/10/2018
École doctorale :	Sorbonne Université / Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Tuteur de thèse :	Nathalie BERTRAND
Directeur de thèse :	Laurent LI - Laboratoire de Météorologie Dynamique
Financement de thèse :	IRSN / CSTB

Pour la période de 1988-2013, les sinistres attribués aux tempêtes (incluant vent, neige et grêle) ont été le péril le plus coûteux pour les assureurs en représentant près de 50% des indemnités versées suite à un aléa naturel (FFA, 2016) (Fédération Française de l'Assurance). Ce constat fait écho avec l'enjeu de l'IRSN inscrit dans le thème sûreté-sécurité de mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur les installations par des sollicitations ou agressions internes et externes (y compris naturelles) et qui pourraient impacter la sûreté.

Cette thèse, co-encadrée par l'IRSN et le CSTB, s'intéresse plus particulièrement dans le contexte de la caractérisation de l'aléa « vent extrême » et sa prise en compte lors du dimensionnement de bâtiments et d'ouvrages usuels ou spécifiques ainsi que pour la démonstration de sûreté des installations nucléaires sur tout le territoire métropolitain. L'objectif de la thèse est d'affiner et d'améliorer l'approche actuelle qui repose aujourd'hui sur le traitement statistique des séries de données d'observations brutes ou corrigées des effets locaux.

La démarche retenue est double, elle consiste en l'exploitation d'une nouvelle méthode de spatialisation mise en œuvre par Météo-France sur une grille 2x2,8km pour mieux caractériser les zones à faible densité d'observation puis en la différenciation des phénomènes responsables des vents extrêmes et la caractérisation séparée de chaque phénomène avec une méthode adaptée sur tout le territoire. Ces deux facettes permettent d'améliorer les estimations déjà présentes mais d'également assurer la pérennité de leurs études. Les phénomènes ainsi séparés peuvent être alors analysés sur leurs tendances et leurs évolutions futures pour mieux prévoir l'évolution de l'aléa sur le long terme à l'aide des résultats de modèles de climat.

Les premiers résultats indiquent des comportements différents dans les extrêmes de vitesses de vent selon le temps d'intégration des vitesses de vent (intégrées sur un pas de temps 0,5 secondes ou 10 minutes) ainsi que selon les périodes saisonnières considérées. Face à la limitation dans le temps des séries d'observations, il a été nécessaire d'améliorer la méthodologie statistique pour caractériser l'aléa vent. De plus, une méthodologie de séparation des phénomènes de vent extrême prenant en compte une base de données d'occurrence de flash d'éclair basée sur des travaux effectués par Möhr *et al.* (2017)<sup>1</sup> a été mise en œuvre.

1. Mohr, S., Kunz, M., Richter, A., Ruck, B., 2017. Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 17, 957–969. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-957-2017>.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Laurie SAINT CRIQ
Date du début de la thèse :	02 / 01 / 2020
École doctorale :	Université Paris Est / Sciences, Ingénierie et Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Tuteur de thèse :	Yasser HAMDY
Directeur de thèse :	Éric GAUME - Université Gustave Eiffel
Co-directeur :	Taha OUARDA - INRS
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 pour définir ces niveaux en utilisant de l'information régionale et historique en réponse à la faible qualité des séries de données utilisées (séries courtes, trous de mesures, population mixte, présence d'un horsain ...), et aussi 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). La thèse vise à proposer des méthodes 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 dans un premier temps sur l'aléa submersion marine, mais le modèle définitif devrait s'adapter à d'autres aléas hydrométéorologiques (températures, pluies, vents extrêmes ...). Les résultats devraient être directement applicables à l'expertise de sûreté nucléaire.

Une méthode a été proposée pour utiliser des observations historiques en améliorant l'estimation des niveaux de mer 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. La méthode propose 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 sur quatre sites (marégraphes) localisés sur les côtes Atlantique et Manche Françaises. La méthode proposée apparaît non biaisée pour estimer les quantiles et plus fiable que des approches précédentes pour inclure des records historiques pour l'analyse statistique des niveaux de mer ou des surcotes de pleine mer.

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

➤ LA SOIRÉE DU MERCREDI 31 MARS  
RÉSERVÉE AUX DOCTORANTS

# Soirée Jeux de L'ADiGN

ASSOCIATION  
DES DOCTORANTS  
DE L'IRSN

Journée des thèses 2021  
Mercredi 31 mars

## Au programme

19h30-20h

**Pictionnary**



20h05-20h35

**Code names**

20h40-21h10

**Blind test**



21h25-22h30

**Apéro Visio**

« Si tu n'étais pas doctorant,  
qu'est ce que tu aurais voulu faire ? »







➤ Jeudi 1<sup>er</sup> avril

09 h 00 - 10 h 15 L'auditorium

#### SESSION PARALLÈLE

➤ DÉVELOPPEMENT DE CONTREMESURES MÉDICALES ADAPTÉES AUX EFFETS SECONDAIRES DE LA RADIOTHÉRAPIE ET AUX CONSÉQUENCES DES SITUATIONS ACCIDENTELLES

**Président: Thierry BOURGOIS**

Chef de service du SP<sup>3</sup>In - Direction de la stratégie

**Clément BROSSARD** - Traitement par thérapie cellulaire des effets secondaires des radiothérapies sur la vessie.

**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.

**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

Traitement par thérapie cellulaire des effets secondaires des radiothérapies sur la vessie

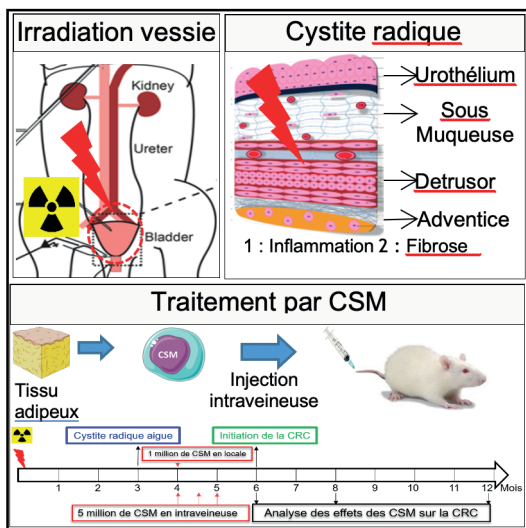
Doctorant : Clément BROSSARD  
 Date du début de la thèse : 15/10/2018  
 École doctorale : Sorbonne Université / Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique  
 Laboratoire d'accueil : PSE-SANTE/SERAMED/LRMed  
 Tuteur de thèse : Alain CHAPEL  
 Directeur de thèse : Alain CHAPEL - IRSN  
 Financement de thèse : IRSN

Ce sujet s'intègre dans l'axe-programme [D]3[P]7, développant des approches expérimentales sur les pathologies radio-induites. Cette thèse est dans la continuité de l'étude des traitements par thérapie cellulaire des séquelles des radiothérapies.

La cystite radique chronique (CRC) est une pathologie résultant de l'irradiation de la zone pelvienne, actuellement sans traitement curatif. Elle est caractérisée par une inflammation chronique de la vessie conduisant à une fibrose. Une nouvelle approche thérapeutique basée sur des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) est évaluée.

Notre étude est divisée en deux parties, la modélisation de la CRC puis l'effet du traitement par les CSM. La modélisation chez le rat a été réalisée par irradiation localisée de la vessie, guidée par tomodensitométrie pour une gamme de doses de 20 à 80 Gy avec un suivi de 3 à 12 mois. Pour le traitement par les CSM, la vessie a été irradiée à 40 Gy. Quatre mois après irradiation, une injection intraveineuse a été effectuée toutes les deux semaines, de  $5 \cdot 10^6$  CSM (3 injections au totale). Un suivi physiologique, histologique et moléculaire a été effectué sur 12 mois post-irradiation.

Nous avons observé que l'intensité et la fréquence des hématuries sont proportionnelles à la dose d'irradiation. La fibrose débute à 6 mois post-irradiation et s'accroît au cours du temps en fonction de la dose d'irradiation. L'inflammation (surexpression des gènes CCL5, IL1 $\beta$  et IL6) est également observée à 6 mois, accompagnée de lésions de l'urothélium (zones sans urothélium avec une diminution de l'urolakine III). A 10 mois post-irradiation, une régénération imparfaite de l'urothélium accompagnée d'une hyperplasie est mise en évidence. Une étude en cystoscopie, a permis de montrer que l'injection de CSM chez les rats irradiés réduit les lésions vasculaires après irradiation.



Les résultats ont montré une initiation de la CRC dès 6 mois post-irradiation, avec une inflammation chronique, une hématurie, une désorganisation de l'urothélium et une fibrose qui s'accroissent avec le temps. Le traitement par les CSM a permis de diminuer les lésions vasculaires. L'analyse de l'effet des CSM sur l'inflammation, la régénération de l'urothélium et la fibrose est en cours.

SUJET DE LA THÈSE

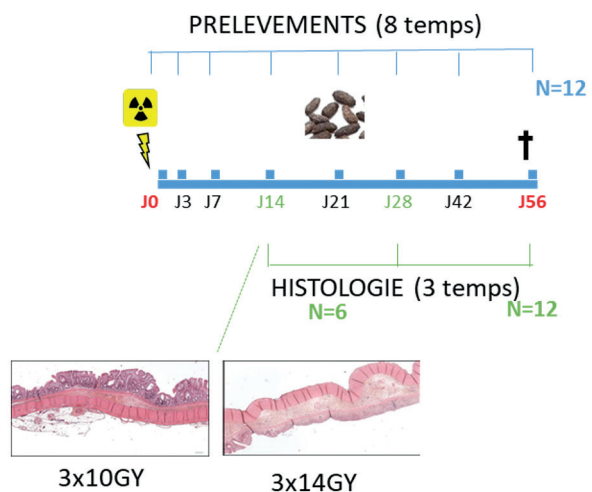
Effet d'une transplantation du microbiote fécal sur les atteintes épithéliales radio-induites du côlon de rat : potentialisation de l'efficacité thérapeutique induite par les cellules stromales mésenchymateuses

Doctorant : Mallia GEIGER  
 Date du début de la thèse : 04/11/2019  
 Ecole doctorale : Sorbonne Université / Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique  
 Laboratoire d'accueil : PSE-SANTE/SERAMED/LRMed  
 Tuteur de thèse : Alexandra SEMONT  
 Directeur de thèse : Fabien MILLIAT - IRSN  
 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) on pourrait 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. En parallèle, la caractérisation de la réponse inflammatoire a été établie 15J, 28J et 56J après la dernière dose d'irradiation. Les résultats montrent une augmentation des cellules immunitaires à 15 J et significatif après le protocole 3X14Gy. A 56 J, les macrophages se stabiliser à un taux plus élevé que le taux basal et les mastocytes augmentent. Une analyse du phénotype des cellules immunitaires ainsi que du profil des cytokines au sein de la muqueuse colique est en cours.

Ces résultats seront incrémentés par les analyses en cours du microbiote (génomique complet) et du métabolome en collaboration respective avec MGP et CRIBIOM, attachés à l'INRAe. Cette première partie de thèse donne des informations sur le modèle d'irradiation, l'impact sur le microbiote et la relation hôte-symbiote. Elle est indispensable pour développer la deuxième partie : le traitement par TMF.



## 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

Doctorant :	Lydia BENSEMMANE
Date du début de la thèse :	04 / 11 / 2019
École doctorale :	Sorbonne université / Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Christine LINARD
Directeur de thèse :	Christine LINARD - IRSN
Co-directeur :	Xavier TRETON - Hôpital de Beaujon
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, 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 entraînant la mort en 1 à 2 semaines. Actuellement, ce syndrome engage rapidement le pronostic vital. 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 inguinal, sur le SGI. Cette étude répond à l'une des questions stratégiques de L'IRSN qui est « Quelles approches thérapeutiques innovantes proposer en réponse aux différentes pathologies associées aux fortes doses de rayonnements pour en améliorer la prise en charge ? ». 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 intraveineuse 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. La SVF accélère la régénération intestinale en stimulant les cellules clés du compartiment cellules souches (Cellules de Paneth, cellules en position +4) initiant ainsi une différenciation cellulaire. Des foyers d'hyperproliférations au niveau de la crypte sont également observés en histologie. L'analyse phénotypique des monocytes montre une augmentation de la population de monocytes anti-inflammatoires (C11b<sup>+</sup>/ Ly6C<sup>-</sup>/Cx3cr1<sup>+</sup>), 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.

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

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

Lors d'un incident ou accident nucléaire impliquant des composés de cobalt ou strontium, les options thérapeutiques actuellement recommandées (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) manquent de spécificité et les preuves d'efficacité demeurent modestes, nécessitant ainsi d'envisager des alternatives plus adaptées. L'amélioration de la prise en charge médicale des personnes exposées suite à un accident nucléaire ou radiologique ou à un acte de malveillance fait partie intégrante de la stratégie scientifique de l'IRSN. Ce projet de thèse qui s'inscrit parfaitement dans les défis de l'Institut aura pour mission d'apporter des éléments concrets dans un secteur en demande.

Le projet se déroule en trois volets comme suit : a) sélection de la ou des molécule(s) d'intérêt appartenant à la famille des bisphosphonates (BP) identifiés comme susceptibles de former des complexes stables avec le cobalt et le strontium et encapsulation des BP préalablement sélectionnés dans des vecteurs médicamenteux sélectifs pour cibler plus précisément les organes de rétention des radionucléides, b) évaluation de l'efficacité chez le rongeur des nouveaux traitements *versus* ceux actuellement en vigueur, c) finalisation des études *in vivo* en cours, analyse des données, valorisation sous forme de communications, et rédaction du manuscrit.

Dans le cadre du premier volet, après des résultats non concluants en spectrophotométrie UV/Visible, nous nous sommes orientés vers la technique de chromatographie ionique couplée à une détection ICP-MS (ou IC-ICP-MS) qui propose des atouts indéniables : la sélectivité moléculaire, la sélectivité élémentaire et la sensibilité de mesure. Les premières expériences nous ont permis de visualiser parfaitement les BP et les cations divalents mais la mise en évidence des complexes (BP-métal) est plus délicate. Afin d'y remédier, nous travaillons actuellement sur les conditions expérimentales *via* des expériences dites en batch. Les derniers résultats obtenus semblent prometteurs et nous envisageons maintenant de transposer ces nouvelles conditions au couplage IC-ICP-MS. L'étape de sélection de la ou des molécule(s) candidate(s) requiert plus de temps que prévu mais demeure essentielle à l'avancée du projet.





➤ Jeudi 1<sup>er</sup> avril

09h00 - 10h15 La Grande Motte

#### SESSION PARALLÈLE

➤ **MISE EN ŒUVRE DE DISPOSITIFS DE MESURES ET DE DÉMARCHES MÉTHODOLOGIQUES POUR CARACTÉRISER LES RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT**

**Présidente: Catherine LECOMTE**

Chargée de mission auprès du chef de service - PSE-ENV/ SRTE

**Nathan BODEREAU** - Sources et comportement du  $^{14}\text{C}$  dans un fleuve nucléarisé (Rhône).

**Pierre LEFEBVRE** - Évolution à long terme de la spéciation et de la mobilité de l'uranium dans les sédiments lacustres.

**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

### Sources et comportement du $^{14}\text{C}$ dans un fleuve nucléarisé (Rhône)

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

---

Le Carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) est un isotope radioactif du Carbone (C) comprenant des origines naturelles mais aussi anthropiques notamment à travers les rejets des industries nucléaires (CNPE) dans les environnements aquatiques. Le  $^{14}\text{C}$  rejeté par ces industries se distribue au sein de différentes fractions organiques et inorganiques du C en fonction de mécanismes biogéochimiques complexes incluant des cinétiques variées. Les objectifs de cette thèse sont, dans un premier temps, de mieux comprendre le comportement du radionucléide au sein du cycle du C en milieu aquatique et, dans un second temps, de distinguer le  $^{14}\text{C}$  anthropique du  $^{14}\text{C}$  naturel.

Les travaux de cette thèse sont fondés sur l'acquisition de données de terrain, à l'échelle du bassin versant rhodanien, sur un cycle hydrologique d'au moins une année, afin de capter les fluctuations de flux d'eau et de matières en suspension. Des analyses de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  sont effectuées sur les phases Organique Dissoute (COD), Inorganique Dissoute (CID) et Organique Particulaire (COP) ainsi que des analyses de nutriments.

Une revue de la littérature sur la dynamique du  $^{14}\text{C}$  dans les fleuves a été réalisée et a mis notamment en avant un contraste latitudinal des concentrations dans les fractions organiques, lié au contexte climatique. Ce travail, en cours de rédaction pour une publication, démontre aussi l'impact de l'homme sur les signatures  $^{14}\text{C}$ . Les fleuves sujets à une forte urbanisation et activité agricole présentent des teneurs en  $^{14}\text{C}$  peu enrichies à cause d'une dilution causée par : 1) la mobilisation de Carbone très ancien conservé dans les roches sédimentaires, présentes à l'affleurement, ou les horizons de sol profonds, 2) l'introduction de polluants organiques (e.g., pesticides, surfactants). A l'inverse, des valeurs 2 à 3 fois supérieures au référentiel atmosphérique ( $226 \text{ Bq.kgC}^{-1}$ ) ont été observées dans la phase CID, forme initiale du  $^{14}\text{C}$  rejeté par les CNPE, pour les rivières nucléarisées. Néanmoins, ces données élevées, dans la littérature, ne sont pas ou peu observées dans les phases organiques malgré les mécanismes de transferts entre chacune des phases.

La campagne d'échantillonnage sur le Rhône devrait donc répondre à ce point. Le démarrage des prélèvements et des instrumentations, prévu pour mars 2020, a été suspendu et reporté à fin 2020. Compte tenu du long délai pour les analyses de  $^{13}\text{C}$  et de  $^{14}\text{C}$ , les résultats seront mis à disposition avec un retard de l'ordre de 6 mois sur le calendrier initial.



## SUJET DE LA THÈSE

### Évolution à long terme de la spéciation et de la mobilité de l'uranium dans les sédiments lacustres

Doctorant :	Pierre LEFEBVRE
Date du début de la thèse :	01/09/2018
École doctorale :	Sorbonne Université/ Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV/ SEDRE/ LELI & Sorbonne Université/ IMPMC
Tuteurs de thèse :	Arnaud MANGERET/ Alkiviadis GOURGIOTIS
Directeur de thèse :	Guillaume MORIN - IMPMC
Financement de thèse :	Sorbonne Université

L'uranium (U) est un radionucléide caractéristique du cycle du combustible nucléaire dont il est essentiel de limiter la dispersion dans l'environnement. À ce titre, la compréhension des mécanismes d'immobilisation de l'uranium dans les milieux réducteurs est une étape indispensable pour assurer la gestion pérenne des déchets uranifères et la remédiation des sites contaminés. En particulier, il devient important de déterminer le comportement à long-terme des espèces d'U(IV) non-cristallines, dont le rôle majeur dans le contrôle de la mobilité de l'uranium dans les environnements de (sub-)surface a récemment été démontré.

Dans cet objectif, nous avons étudié l'évolution de la spéciation de l'uranium sur plusieurs milliers d'années dans les sédiments naturellement enrichis en U du Lac Nègre (altitude 2354 m, Mercantour, France), considéré comme un analogue de sites lacustres contaminés. Plusieurs carottes de sédiments ont été prélevées sous 24 m d'eau et préservées en conditions anoxiques. Les sédiments les plus profonds ont été datés à 3300 ans cal BP. Ces sédiments riches en matière organique et en silice montrent une augmentation de la teneur en U avec la profondeur, de 350 à plus de 760 µg/g. L'ultrafiltration des eaux de surface et les rapports isotopiques de l'U ( $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  et  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) dans les sédiments et les eaux suggèrent que le mode de dépôt de l'U n'a pas varié significativement dans le temps, ce qui permet d'étudier les effets de la diagenèse sur la spéciation de l'U sur plusieurs milliers d'années.

L'analyse par spectroscopie XANES au seuil  $L_{III}$  de l'uranium, utilisant le rayonnement synchrotron, montre que l'U est complètement réduit en U(IV) en profondeur. La spectroscopie EXAFS au seuil  $L_{III}$  de l'U révèle que l'uranium forme des polymères avec la silice après moins de 700 ans, avec une structure proche de la coffinite ( $\text{U}^{\text{IV}}\text{SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), ce qui indique que la diagenèse en conditions anoxiques transforme la spéciation solide de l'U. Cependant, cette transformation ne réduit que très légèrement la labilité potentielle de l'U, ce qui pourrait avoir d'importantes conséquences pour la gestion des sédiments contaminés (Lefebvre *et al.* 2021, in press<sup>1</sup>).

Par ailleurs, une étude complémentaire sur d'autres carottes de sédiments du même lac remontant à plus de 9200 ans a permis de montrer que les flux d'U vers le Lac Nègre sont contrôlés par l'érosion des sols, et donc par le climat à l'échelle de l'Holocène. Des études supplémentaires sont également en cours sur le transport et l'accumulation d'U à l'échelle du bassin versant.

1. Lefebvre *et al.* (2021) *Diagenetic formation of uranium-silica polymers in lake sediments over 3,300 years*, *PNAS*, in press.

## 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

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

---

Les mesures par spectrométrie gamma du rapport isotopique  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  permettent d'identifier les contributions en césium (Cs) des accidents nucléaires et des sources de rejet plus anciennes liées par exemple aux essais nucléaires atmosphériques. Toutefois, en raison de la courte période radioactive de  $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 2,1$  a), l'utilisation de ce rapport est limitée dans le temps. Ainsi, à ce jour, 35 ans après l'accident de Tchernobyl,  $^{134}\text{Cs}$  n'est plus quantifiable en France dans les zones marquées par ces retombées. Une alternative est donc nécessaire afin de fournir un nouveau traceur autant utile à la surveillance environnementale qu'à l'expertise des sols et des sédiments contaminés.

L'utilisation du rapport  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}$  de  $2,3 \cdot 10^6$  et de 30,1 a, respectivement) est très prometteuse sur le long terme, mais plusieurs obstacles analytiques existent liés notamment à la difficulté de mesurer  $^{135}\text{Cs}$  par comptage bêta. Grâce aux développements réalisés lors des deux dernières décennies, la quantification des atomes de  $^{135}\text{Cs}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  par spectrométrie de masse est devenue possible au prix d'une radiochimie poussée et d'une mesure très performante. Malgré ces progrès, le manque de traceurs et de matériaux de référence certifiés en  $^{135}\text{Cs}$  constitue encore une difficulté.

Cette thèse, centrée sur la métrologie de  $^{135}\text{Cs}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  dans les échantillons de l'environnement à très bas niveau de radioactivité, se décompose en deux parties :

- I. le développement d'un protocole radiochimique et l'optimisation de la mesure par ICP-MS/MS très sélectifs vis-à-vis de Cs,
- II. la validation et l'application du protocole sur des échantillons de l'environnement afin de contribuer à la connaissance du fond radiologique.

Au cours de cette première période de la thèse, la stratégie de développement du protocole a été définie. La première étape est la mise en solution du césium dans 100 g de sol ou de sédiment, suivie de la préconcentration des atomes de Cs avec la molécule d'AMP (molybdophosphate d'ammonium). Une fois la matrice éliminée, le césium est séparé des interférents de mesure (Ba, Mo, Sb, Sn) via une série de purifications sur résines échangeuses d'ions. La fraction purifiée est ensuite mesurée par spectrométrie de masse.

Les premiers résultats obtenus sur des échantillons de 10 g de sol sont très prometteurs. Plus de 95 % de  $^{133}\text{Cs}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  sont récupérés lors de la mise en solution de l'échantillon et lors de la préconcentration des atomes de Cs (mesures réalisées respectivement par spectrométrie de masse et par spectrométrie gamma). Un point clé sera d'adapter ces étapes aux prises d'essais nécessaires (100 g). En parallèle, l'optimisation des paramètres pour la mesure du rapport  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  par spectrométrie de masse (ICP-MS/MS) sera effectuée puis les premiers échantillons de l'environnement français seront mesurés.

➤ Jeudi 1<sup>er</sup> avril

10h35-11h35

SESSION POSTER

11h40-13h00 L'auditorium

SESSION PARALLÈLE

➤ DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS DE MESURES

**Président: Jean-François BOTTOLIER-DEPOIS**

Adjoint au Directeur de la Santé

**Mélody PALLU** - Études des doses pour le personnel navigant de l'aviation civile liées aux flashes gamma terrestres et autres phénomènes électriques atmosphériques.

**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.

**Ayedah TARIQ** - Développement de capteurs à fibre optique dédiés à la mesure *in situ* du pH de bétons.

**Marine BOUDIAS** - Développement de supports hautement sélectifs pour l'étude de la migration des contaminants radioactifs ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) dans l'environnement.

## SUJET DE LA THÈSE

## Études des doses pour le personnel navigant de l'aviation civile liées aux flashes gamma terrestres et autres phénomènes électriques atmosphériques

Doctorant :	Mélody PALLU
Date du début de la thèse :	01 / 03 / 2019
École doctorale :	Université d'Orléans / EMSTU
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SDOS / LDRI
Tuteur de thèse :	François TROMPIER
Directeur de thèse :	Sébastien CELESTIN - Université d'Orléans
Financement de thèse :	CIFRE - Air France

Produits dans des orages communs dans la moyenne atmosphère (~12 km), les flashes « gamma » terrestres (TGF) sont en fait des flashes de rayons X de très courtes durées (<1 ms) liés à l'accélération d'électrons dans les orages. Ces rayons X peuvent atteindre de très hautes énergies (jusqu'à quelques dizaines de MeV).

Produits par les mêmes mécanismes physiques, les *Gamma ray Glows* sont des élévations du rayonnement gamma de fond lors d'orages, sur des durées plus longues (> 1 seconde). On considère aujourd'hui que les *Glows* sont des événements fréquents.

Très peu de mesures dosimétriques ont pu être réalisées pour évaluer l'exposition des personnels navigants (PN) à ces phénomènes. Ce travail de thèse a donc pour but d'estimer les doses additionnelles dues à ces événements en se basant sur deux approches complémentaires : l'étude théorique avec des simulations numériques de ces phénomènes, et la mise au point d'un programme de mesure. Il s'inscrit dans le programme de recherche de l'IRSN notamment en essayant de répondre à la question *Comment améliorer les concepts, méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions des travailleurs, de la population, des patients et des écosystèmes, tenant compte de questionnement d'ordre éthique ?* concernant le risque dû à l'exposition du PN.

À l'aide de simulations Monte Carlo nous permettant de simuler la propagation des particules impliquées dans un TGF (électrons source et photons du TGF), nous avons montré que la dose générée par les électrons peut atteindre 1 Sv selon les deux modèles utilisés, dans le volume restreint de la source du TGF ; les doses générées par les photons sont plus faibles (< 1 mSv) mais sur des régions plus étendues.

En parallèle de cette étude théorique, le développement d'un spectromètre gamma à haute résolution temporelle a été effectué, et adapté aux hautes énergies. Deux vols par temps clair ont déjà été effectués, alors que la préparation du détecteur pour la participation à une campagne ballon (CNES/Strateole 2) d'une durée de ~3 mois au niveau de l'équateur pour fin 2021 est en cours. Cette campagne est une opportunité unique de pouvoir mesurer ces deux types d'événements, ceux-ci étant plus fréquents entre les deux tropiques, d'autant plus qu'aucune mesure de ce type n'a encore été réalisée. Un programme de mesure en vol en continu sur des lignes régulières en collaboration avec Air France est également à l'étude pour mieux appréhender la fréquence et les niveaux d'exposition.

## 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

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

Les études relatives aux mécanismes de transfert de l'iode dans l'environnement, notamment à proximité de l'usine Orano la Hague, sont primordiales. L'iode  $^{129}$  est en effet rejeté de façon chronique par cette usine dans l'environnement marin et dans l'atmosphère. Dans le cadre de cette thèse, la réémission de l'iode du milieu marin vers le littoral sous forme de gaz ou d'aérosol sera évaluée au regard des rejets atmosphériques directs sur une période de 1 an.

Afin d'y parvenir, une nouvelle méthode d'analyse sera mise en place et appliquée à des échantillons de filtres aérosols, charbon et eaux de mer. En effet, ce radionucléide est couramment mesuré par spectrométrie gamma mais les limites de détection avec cette technique sont souvent supérieures aux niveaux dans l'environnement. L'ICP-MS constitue une excellente alternative de par sa rapidité, son principe de fonctionnement indépendant de l'énergie d'émission et la quantification du rapport isotopique  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ .

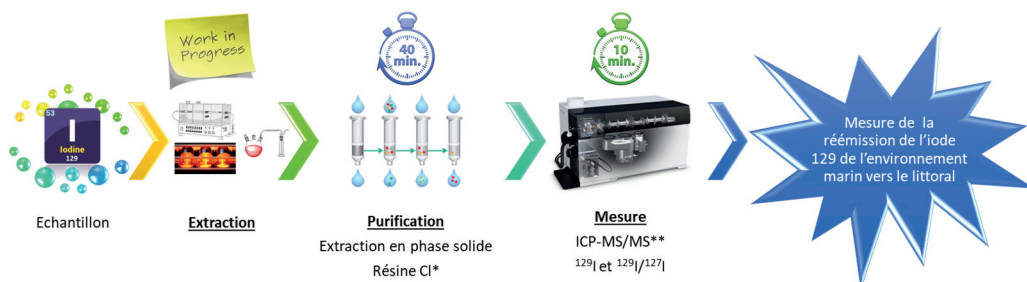
Les verrous scientifiques lors de la purification et la mesure sont liés à l'extrême volatilité de l'iode, à ses multiples degrés d'oxydation et aux interférences spectrales et non spectrales.

Dans un premier temps, un milieu optimal de mesure a été investigué pour s'adapter à la volatilité de l'iode et pour s'affranchir des interférences non spectrales qui sont les effets matrices et mémoires.

Dans un second temps, la purification par extraction en phase solide a été développée de sorte que le milieu d'élution soit compatible avec l'ICP-MS. Les interférents polyatomiques ont pu ainsi être supprimés.

Enfin, l'interférence isobarique due au  $^{129}\text{Xe}^+$ , présent comme impureté dans l'argon, a été éliminée lors de la mesure 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 durée du traitement chimique a été diminuée à 40 min, ce qui a permis d'augmenter la prise d'essai jusqu'à 1 L. Un gain en sensibilité jusqu'à un facteur 200 a été observé et a permis d'estimer la limite de détection à  $8 \text{ mBq.L}^{-1}$  et à  $0,15 \text{ mBq.L}^{-1}$  après traitement chimique, ce qui est 100 fois inférieur à certaines méthodes actuelles.



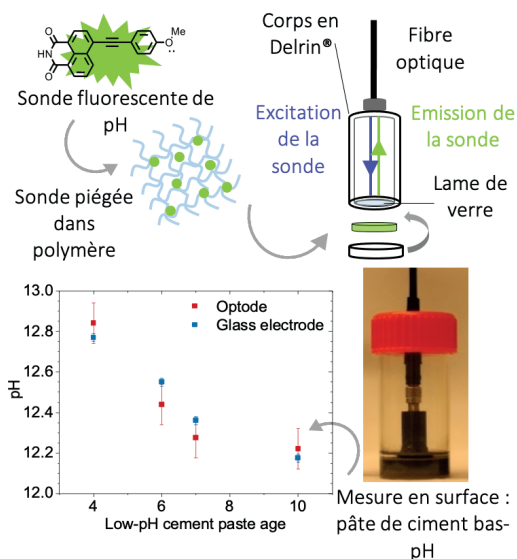
## SUJET DE LA THÈSE

Développement de capteurs à fibre optique dédiés à la mesure *in situ* du pH de bétons

Doctorant :	Ayedah TARIQ
Date du début de la thèse :	03/10/2018
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Sciences chimiques 2MIB
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV/ SEDRE/ LETIS
Tuteur de thèse :	Alexandre DAUZERES
Directeur de thèse :	Isabelle LERAY - ENS Paris-Saclay
Financement de thèse :	IRSN

La conception d'un centre industriel de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (projet Cigéo) prévoit l'utilisation d'importants volumes de matériaux cimentaires. L'emploi de ces matériaux cimentaires induit nécessairement un questionnement quant à leur résistance mécanique, sous différentes contraintes environnementales, durant et après l'exploitation du site. L'évolution du comportement mécanique des structures cimentaires résulte principalement des perturbations physico-chimiques, dont les mécanismes réactifs sont globalement connus. Cependant, l'évolution chimique de la solution porale, contenue dans les matériaux cimentaires et gouvernant les phases d'hydratation et de vieillissement, n'est pas totalement appréhendée. Le pH de cette eau porale constitue un indicateur fiable de l'état d'altération des structures cimentaires, cependant, peu de données expérimentales relatives à son évolution sont disponibles dans la littérature. Les méthodes de mesure du pH conventionnellement employées n'étant pas adaptées aux valeurs de pH extrêmes des bétons (pH = 12,45- 13,5 pour un ciment Portland). Dans ce contexte, les sondes optiques exploitant un transducteur chimique, également appelées optodes, constituent une alternative intéressante.

Les objectifs visent à concevoir une optode de pH afin de suivre le vieillissement de matériaux cimentaires *in situ*, depuis la prise jusqu'à plusieurs mois/années. Cet outil permettrait de confronter les résultats expérimentaux nouvellement acquis à des modèles d'hydratation et de vieillissement préexistants. Afin de vérifier le domaine de validité des mesures par rapport à l'état de saturation en eau du matériau, l'optode sera testée en enceinte climatique au laboratoire LUTECE (FAR) dans des échantillons de matériaux cimentaires tout en contrôlant l'humidité et la température. L'élaboration de sprays et de polymères répondant aux variations de pH sera également testée pour cartographier le pH de bétons issus d'ouvrages existants.



Une première optode basée sur un dérivé naphthalimide a été élaborée et validée en solution pour une gamme de pH =10,5-12.8. Ainsi le pH en surface de pâtes de ciment bas-pH a été suivi au cours des 10 premiers jours d'hydratation (c.f. Figure). Afin de suivre le pH *in situ*, différentes sondes fluorescentes plus stables à pH > 13 sont en cours de synthèse et d'étude, incluant des amines tertiaires et des dérivés guanidinium.

## SUJET DE LA THÈSE

**Développement de supports hautement sélectifs pour l'étude de la migration  
des contaminants radioactifs ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) dans l'environnement**

Doctorant :	Marine BOUDIAS
Date du début de la thèse :	05/11/2018
École doctorale :	Sorbonne Université / Chimie physique et chimie analytique de Paris Centre
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Tuteur de thèse :	Alkiviadis GOURGIOTIS
Directeur de thèse :	Nathalie DELAUNAY - ESPCI Paris
Co-directeur :	Alkiviadis GOURGIOTIS - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

Au cours des dernières décennies, les activités humaines (essais et accidents nucléaires, mines d'uranium) ont libéré à la surface de la Terre de nombreux radionucléides naturels et artificiels. Bien que leur abondance soit extrêmement faible, leur persistance dans l'environnement peut conduire à des expositions chroniques de l'Homme et des écosystèmes, dont il convient d'évaluer les conséquences. Cette étude cible deux radionucléides, le  $\text{Ra}^{226}$  et le  $\text{Cs}^{137}$ , qui font partie des radionucléides les plus radiotoxiques. L'optimisation de la surveillance radiologique de l'environnement nécessite de mieux comprendre les processus responsables de leur migration entre les différents compartiments de la biosphère et de la géosphère. Des techniques analytiques telles que la spectrométrie de masse et la spectrométrie gamma sont souvent utilisées pour la mesure de ces éléments. Cependant, l'analyse directe peut se heurter à certaines limites : interférences spectrales, effets de matrice ou limite de détection insuffisante. Une étape de traitement de l'échantillon en amont de l'analyse est alors nécessaire. Les protocoles existants font souvent appel à des résines échangeuses d'ions ne présentant pas une sélectivité totale pour ces éléments. De plus, certaines procédures d'extraction multi-étapes se révèlent chronophages et inadaptées à de petits volumes d'échantillons.

L'objectif de cette thèse est de synthétiser pour la première fois des supports très sélectifs basés sur la technologie de l'empreinte moléculaire (Ion-Imprinted Polymer ou IIP) pour l'extraction du radium et du césium, présents à l'état de traces, dans des échantillons environnementaux. Les performances de l'IIP le plus prometteur seront comparées à celles d'une résine basée sur la technologie de reconnaissance moléculaire, développée par un partenaire. Le meilleur des supports sera miniaturisé pour permettre l'analyse d'échantillons de l'ordre du  $\mu\text{L}$ .

Huit IIP ont d'abord été synthétisés en utilisant des éléments non radioactifs comme empreintes (césium stable et baryum, comme analogue du radium) et en faisant varier la nature des monomères et solvants. Après optimisation de la procédure d'extraction, ces polymères ont montré des propriétés de rétention mais aucune sélectivité. Des études de complexation ont ensuite été menées par conductimétrie et spectrométrie de masse (Orbitrap) afin d'acquérir des données sur l'affinité des ligands, la stœchiométrie ainsi que la cinétique de complexation. Ces caractérisations ont donné lieu à la synthèse d'un IIP prometteur permettant de séparer le radium des alcalins et d'autres métaux (V, Mo, W, As, Sb, etc.). La répétabilité de la synthèse a été évaluée et un gain de spécificité a été obtenu en faisant varier la proportion de ligands.





➤ Jeudi 1<sup>er</sup> avril

11 h 40 - 13 h 00 La Grande Motte

## SESSION PARALLÈLE

### ➤ COMPRÉHENSION ET MODÉLISATION DES ACCIDENTS EN RÉACTEUR

**Président: Joachim MISS**

Chargé d'évaluation de la maîtrise des risques radiologiques et nucléaires en charge des SMR

**Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN** - Étude du comportement au fluage des gaines en alliage de zirconium pré-oxydées sous sollicitations thermomécaniques simulant un accident de perte de réfrigérant primaire.

**Jean MULLER** - Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide.

**Jimmy MARTIN** - Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation gravitaire dans un bassin.

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

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

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude du comportement au fluage des gaines en alliage de zirconium pré-oxydées sous sollicitations thermomécaniques simulant un accident de perte de réfrigérant primaire**

Doctorant :	Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2018
École doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEREX / LE2M
Tuteur de thèse :	Jean DESQUINES / Tatiana TAURINES
Directeur de thèse :	Marie-Christine BAIETTO - Insa Lyon
Financement de thèse :	IRSN / EDF / INSA Lyon

Lors d'un APRP, les gaines de combustible d'un réacteur à eau sous pression peuvent être soumises à des sollicitations thermomécaniques sévères. La température des gaines peut atteindre plus de 1000°C et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la gaine peut dépasser 100 bars. Pendant le fonctionnement normal du réacteur, les gaines se corrodent au contact avec l'eau du circuit primaire. En cas d'APRP, l'oxydation des gaines est accélérée par leur échauffement. Ce travail vise à étudier le comportement thermomécanique de la gaine dans de telles conditions de chargement, en tenant compte de son état pré-accidentel de corrosion. Dans ces conditions, plusieurs physiques couplées influencent le comportement de la gaine. Il s'agit notamment du couplage entre le fluage du métal et de l'oxyde, de la diffusion de l'oxygène, de l'oxydation et de la fissuration. Une approche par effet séparé est adoptée pour étudier expérimentalement les phénomènes d'oxydation et de ballonnement.

D'une part, des essais d'oxydation ont été effectués à haute température afin d'étudier l'oxydation des gaines sans chargement mécanique externe et d'étendre la base de données existante de l'IRSN. Ces essais ont permis de déterminer les coefficients de diffusion dans le métal à 750°C et 820°C en couplant plusieurs moyens de mesures (microsonde de Castaing, métallographie, permascopie). D'autre part, des essais semi-intégraux de ballonnement de gaine sous chargement thermomécanique imposé ont également été réalisés sur la plateforme ELLIE située à l'Insa de Lyon. Ces essais ont mis en évidence l'effet du pré-oxyde sur le ballonnement des gaines pré-oxydées. Trois régimes de ballonnement sont observés. Dans le premier régime observé en début d'essai, la couche d'oxyde n'est pas fissurée, elle joue un rôle renfort et le ballonnement de la gaine est négligeable. Dans le second régime, la couche d'oxyde se fissure et perd son caractère renfort, un ballonnement de la gaine par localisation des déformations dans les zones de métal à nues est alors observé. La vitesse de ballonnement dans ce second régime est fortement liée à l'état d'endommagement de l'oxyde. Le troisième régime qui mène à l'éclatement de la gaine correspond au fluage tertiaire.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide

Doctorant :	Jean MULLER
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2018
École doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEMIA / LIMAR
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Marc CLAUSSE - CETHIL
Financement de thèse :	IRSN / EDF

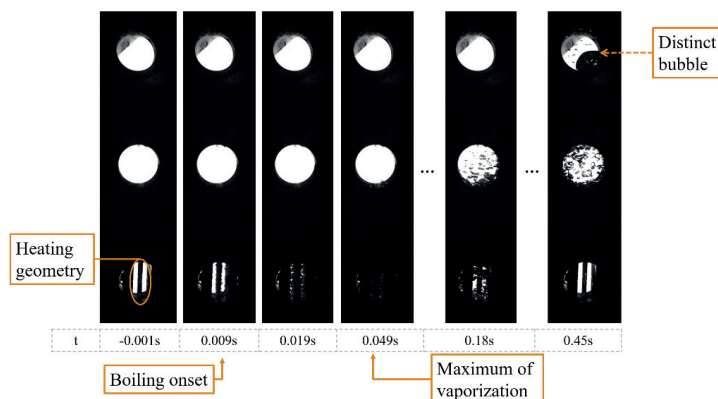
Le travail de thèse a pour objectif principal l'étude du comportement de l'eau pressurisée du cœur d'un réacteur lors d'une interaction thermique avec des fragments de combustible solides à très haute température. Cette situation correspond à un scénario hypothétique d'accident de réactivité ayant mené à la rupture de la gaine du crayon. Lors de cette interaction, l'échange de chaleur est très intense du fait de la forte différence de température (de l'ordre de 2000°C entre les fragments et l'eau) et de la taille des fragments (10 µm environ pour les plus fins). Ceci induit deux phénomènes successifs :

- la propagation d'une onde de pression venant solliciter mécaniquement le voisinage du crayon rompu ;
- la formation d'une poche de vapeur venant mettre en mouvement le fluide environnant et dégradant le refroidissement des crayons voisins.

La compréhension de ces phénomènes constitue un enjeu de sûreté important, c'est pourquoi l'IRSN développe le logiciel CIGALON.

La boucle E.D.I.T.E (Étude d'un Dépôt Important et Transitoire d'Énergie), développée en collaboration avec le CETHIL (INSA Lyon) lors d'une précédente thèse (Abbate-2018), permet de reproduire cette phénoménologie dans des conditions de laboratoire. L'eau pressurisée est simulée par du dioxyde de carbone supercritique à 52 bars et -6 °C. L'utilisation d'un élément de tungstène, chauffé par effet Joule, permet de reproduire un choc thermique violent entre un élément chaud (W) et le réfrigérant (CO<sub>2</sub>).

La mise en place de hublots en cours de thèse a permis la visualisation des phénomènes d'ébullition et le détachement de bulles autour de l'élément chauffant, ainsi que les phénomènes de transport de vapeur le long du tube (cas où le CO<sub>2</sub> est à saturation) ou de recondensation rapide (cas où le CO<sub>2</sub> est sous-refroidi). Nous pouvons par exemple observer, sur l'image suivante [cas saturé], que la vaporisation a lieu autour des plaques de tungstène et produit plusieurs amas de vapeur se déplaçant dans la section d'essai. À l'aide de la caméra rapide, nous pouvons relier l'apparition des premières bulles à la génération du premier pic de pression. Ces éléments nous permettent de justifier les hypothèses faites sur un modèle théorique développé en parallèle et serviront à valider le logiciel CIGALON.



## SUJET DE LA THÈSE

## Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation gravitaire dans un bassin

Doctorant :	Jimmy MARTIN
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2018
École doctorale :	Université catholique de Louvain / Sciences de l'ingénieur et technologie
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SEMIA/LIMAR
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Yann BARTOSIEWICZ - Université catholique de Louvain
Financement de thèse :	IRSN

Durant un accident de perte de refroidissement en piscine de désactivation, la puissance résiduelle dégagée par les combustibles entreposés au fond du bassin induit un écoulement de convection naturelle. Lorsque de l'eau chauffée s'écoule au sein d'une telle piscine, profonde d'une dizaine de mètres, elle subit une décompression d'environ un bar à mesure qu'elle s'élève en direction de la surface libre du bassin. Si la température du liquide est suffisamment élevée, ce dernier peut alors localement dépasser son point d'ébullition, un processus que l'on nomme surchauffe gravitaire. Dans cette situation, l'eau est thermodynamiquement en équilibre métastable. Dès lors, elle ne peut parvenir à un équilibre stable qu'en s'autovaporisant sous la forme de bulles.

Ces bulles et les niveaux de surchauffe atteints impactent la sûreté des piscines. En effet, des bulles présentes dans le bassin peuvent capter et transporter les espèces radioactives gazeuses dissoutes dans l'eau. Leur éclatement au niveau de la surface libre est une source potentielle d'aérosols contaminants. De plus, leur présence au droit de la section d'aspiration du système de refroidissement de la piscine peut compromettre son redémarrage durant l'accident. Pour autant, le phénomène demeure mal compris et sa modélisation est insuffisante.

Cette thèse, réalisée à l'Université catholique de Louvain, est consacrée à l'étude du phénomène au moyen d'un dispositif expérimental reproduisant, à échelle réduite et à basse pression, la configuration d'une piscine de désactivation. Le dispositif est pilotable en puissance et en pression et dispose de mesures de température, de pression, ainsi que d'une caméra rapide permettant l'observation fine de la formation de bulles.

Sur la base des résultats obtenus en première année, des améliorations matérielles significatives ont été apportées au dispositif, avec en particulier l'ajout d'une sonde optique permettant une mesure en ligne de la concentration en oxygène dissous dans l'eau. Les nouveaux essais réalisés ont permis de montrer que la nucléation de bulles dans le liquide est principalement gouvernée par la présence de gaz dissous en son sein, avec la détermination d'un seuil en concentration d'oxygène. Durant la phase de nucléation, une intensification des transferts de chaleur au sein du dispositif a également été mise en évidence et une corrélation entre les cinétiques d'échauffement et de dégazage du liquide a été établie. Enfin, une modélisation thermodynamique des phénomènes observés a été développée. Dans la suite de cette thèse, les essais de caractérisation du phénomène et les développements thermodynamiques initiés seront poursuivis.

## 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 estaban LUNA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Université de Lorraine / SIMPPE
Laboratoire d'accueil :	PSN/SEMIA/LEMC
Tuteur de thèse :	Tony GLANTZ
Directeur de thèse :	Michel GRADECK - Université de Lorraine
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. Par conséquent, l'efficacité des systèmes de sécurité peut être compromise. 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 thermohydrauliques d'un APRP.

Les outils de simulation comme DRACCAR ont besoin d'être confrontés à des résultats expérimentaux. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente thèse. D'un point de vue thermohydraulique, il est essentiel que DRACCAR puisse simuler de manière précise les différents mécanismes de transfert de chaleur se produisant au niveau d'un sous-canal d'un assemblage. Le but de cette thèse est de contribuer à l'amélioration des modèles de DRACCAR et à la validation du logiciel. 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<sup>1</sup>), est associée au logiciel (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 thermohydrauliques, 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 de la température de vapeur injectée, jusqu'à  $5 \cdot 10^{-3}$  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. La campagne d'essais prévue avec cette nouvelle configuration sera réalisée début 2021. En parallèle, de nouveaux modèles ont été introduits dans le logiciel NECTAR afin de pouvoir simuler les nouveaux essais COLIBRI. Ces modèles permettent notamment de tenir compte de possibles interactions entre les gouttes dans le calcul des transferts thermiques dues à la plus grande fraction volumique. Une fois les essais COLIBRI réalisés et analysés avec NECTAR, la prochaine étape sera de valider le logiciel DRACCAR sur ces essais.

1. 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

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

Doctorant :	Coralie ALVAREZ
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
École doctorale :	Université de Lorraine / SIMPPE
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	William LE SAUX
Directeur de thèse :	Marie-Odile SIMONNOT - LRGP
Financement de thèse :	IRSN

Lors d'un accident de type APRP impliquant une brèche sur le circuit primaire d'une centrale nucléaire, des débris sont générés assez rapidement et peuvent être transportés jusqu'au filtre RIS-EAS des puisards situés au fond de l'enceinte de confinement du réacteur. Ces débris peuvent contribuer au colmatage physique et potentiellement chimique de ces filtres. 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 corrosion des isolants. Pour être en mesure d'appréhender cette situation, il est indispensable de mieux comprendre le phénomène de colmatage chimique.

L'objectif *in fine* 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 le risque de colmatage est avéré.

Une première partie consiste à l'étude en conditions « statiques » de la formation de précipités susceptibles de se produire en situation d'APRP. Pour démarrer cette étude, des essais de dissolution des débris qui peuvent être générés en APRP ont été réalisés. L'objectif étant de déterminer la cinétique de relâchement des espèces considérées (calcium, silicium). Il apparaît que l'apport de silicium dans l'eau de recirculation proviendrait majoritairement des fibres et l'apport de calcium, pour sa part, proviendrait du béton. Ces résultats vont permettre de réaliser des essais avec des solutions modèles

contenant du silicium et du calcium (rapport molaire  $\text{Ca/Si} < 1$ ), afin d'étudier les effets chimiques qui peuvent se produire en situation d'APRP. Les premiers essais sur l'étude de la réactivité entre Si et Ca dans une matrice de solution  $\text{H}_3\text{BO}_3/\text{NaOH}$  ont montré la présence d'un précipité/gel à des concentrations en silicium et en calcium respectivement supérieures à 300 et 50 mg/L. Un effet de la température a été constaté puisque, en dessous de 45/50 °C, aucun précipité ne s'est formé. Les premières analyses MEB-EDX et XPS montrent la présence d'oxyde de silicium, des borates de calcium et des carbonates de calcium.

Ces essais en statique vont être prochainement complétés par des essais en recirculation dans le dispositif à moyenne échelle COPIN présenté sur la figure.



# SESSION POSTERS

DOCTORANTS 1<sup>RE</sup> ANNÉE  
PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

## › UNITÉ DE RECHERCHE - ENVIRONNEMENT

**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.

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

**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.

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

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

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

**Thomas SEYER** - Modélisation du transfert des radionucléides dans les réseaux trophiques du Golfe du Lion.

**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.

**Déo-gratias kily SOURABIE** - Modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie.

## 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
École doctorale :	Université Savoie Mont Blanc / Sciences et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Organisations
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Pierre DICK
Directeur de thèse :	André REVIL - CNRS
Financement de thèse :	IRSN

Le projet de stockage des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (déchets HA-MAVL) en couche géologique profonde prévoit en France une fermeture progressive des quartiers du stockage au fur et à mesure du remplissage des modules d'alvéoles. La conception de ces scellements repose sur la mise en place d'un noyau argileux gonflant à base de bentonite. La performance globale de ces ouvrages de scellement dépendra d'une part, de leurs caractéristiques propres et de leur environnement immédiat (degré de saturation, hétérogénéité, chimie des eaux, perméabilité, présence d'une zone endommagée) et d'autre part, des sollicitations auxquelles ils sont susceptibles d'être soumis (défaut de resaturation, glissement des massifs d'appui). La surveillance de ces différents paramètres physiques et pétrophysiques pendant la phase d'exploitation apparaît comme un élément clé en support à la sûreté après fermeture, car elle doit permettre de s'assurer que le comportement de ces composants évolue favorablement vers l'état final recherché.

Cependant, la surveillance de ces scellements se heurte à des problèmes techniques, comme celui d'assurer une surveillance globale de ces ouvrages sans mettre en péril leurs propriétés de confinement. La géophysique, notamment par méthode électrique, constitue un moyen potentiel pertinent pour pallier ce problème, car : (i) elle peut être conçue de manière non-intrusive ; (ii) elle est sensible aux variations de teneur en eau ; (iii) elle permet de suivre dans le temps des phénomènes dynamiques ; (iv) elle permet de capturer des anomalies locales, que les capteurs isolés ne peuvent pas détecter.

Parmi les méthodes électriques disponibles, la polarisation provoquée spectrale (PPS) semble la plus prometteuse car elle est également sensible à la variabilité minéralogique et chimique des eaux. Par ailleurs, il est possible de relier les paramètres issus de la PPS à la perméabilité du milieu, ce qui constitue une toute nouvelle méthode d'imagerie de la perméabilité des milieux poreux.

Cette thèse sera structurée autour de 3 axes :

- (i) un volet théorique et numérique qui aura pour but d'obtenir un modèle macroscopique de la PPS d'une bentonite ;
- (ii) un volet expérimental pour déterminer les spectres de la polarisation provoquée pour des échantillons de bentonites à différents degrés de saturation, compaction et salinité ;
- (iii) application de la méthode à un cas concret au laboratoire de recherche souterrain de Tournemire.



## SUJET DE LA THÈSE

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

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

L'uranium est un élément chimique qui a été exploité en France métropolitaine entre 1948 et 2001 afin de répondre au développement de l'énergie nucléaire. Son extraction a produit une grande quantité de matériaux miniers (résidus, stériles) dont certains d'entre eux présentent encore jusqu'à 75% de la radioactivité initiale du minerai. Au-delà des radionucléides, ce dernier peut contenir d'autres phases minérales porteuses d'éléments métalliques et métalloïdes (EMM) stables, tels que l'arsenic, le vanadium, le molybdène, le nickel ou encore le sélénium. La gestion des matériaux miniers et plus largement des anciens sites miniers est une problématique toujours actuelle qui n'a jusqu'alors été appréhendée qu'au travers de sa dimension radiologique. L'objectif de cette thèse est de combiner diverses analyses et expérimentations pour évaluer l'effet de la présence d'EMM sur la mobilité de l'uranium et inversement. En effet, ces mécanismes restent encore mal connus et le risque chimique lié aux minéralisations uranifères françaises encore peu étudié. La présence d'EMM peut influencer sur l'impact environnemental d'un site via des réactions biogéochimiques complexes en interactions avec les radionucléides. Ils peuvent influencer la migration de certains éléments chimiques par des phénomènes tels que la sorption ou la précipitation. Il est donc important de s'y intéresser afin d'évaluer au mieux leurs importances dans la problématique de gestion des anciens sites miniers d'uranium français.

Ce travail se basera, en premier lieu, sur la caractérisation de sols et de sédiments issus de divers sites exploités pour l'uranium et dont la présence d'EMM est avérée. Au-delà de l'identification des phases porteuses de métaux, la détermination du mécanisme de piégeage des radionucléides et des EMM (co-précipité, adsorbé, complexé...) à l'échelle atomique (détermination de l'environnement atomique local des EMM) est fondamentale pour comprendre leur mobilité et/ou leur stabilité. Ainsi, l'utilisation des techniques d'analyses tels que la microscopie électronique à balayage, la microsonde de spectroscopie de rayons X à dispersion de longueur d'onde, le plasma à couplage inductif couplé à la spectrométrie d'émission optique ou à la spectrométrie de masse et la diffraction des rayons X, ainsi que des extractions chimiques sélectives. Ces analyses permettront d'identifier les produits complexes agissant comme des pièges secondaires pour l'immobilisation de l'uranium et les formes solides (spéciation) qui, au contraire, favoriseront son relargage.

## 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

Doctorant :	Tingting GENG
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
École doctorale :	Université de Nantes / Matière, Molécules et Matériaux
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SEDRE / LELI & SUBATECH
Tuteur de thèse :	Alkiviadis GOURGIOTIS - IRSN Olivier PÉRON & Karine DAVID - SUBATECH
Directeur de thèse :	Gilles MONTAVON - CNRS
Financement de thèse :	IRSN / Bourse de la région Pays de Loire

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des missions d'expertise et de surveillance de l'environnement menées par l'IRSN, en lien avec les anciens sites miniers d'uranium en France (~ 250 sites). Elle constitue un projet de recherche, portant sur les contaminations diffuses à l'aval des anciens sites miniers. Les activités minières peuvent contribuer à la présence de fortes concentrations en radionucléides naturels de la chaîne de  $^{238}\text{U}$  dans les sols, les sédiments ou les zones humides.

Or, cette présence peut être également due à la contribution du substratum rocheux naturel. En effet, le mécanisme de transport de certains radioéléments, depuis la roche mère jusqu'à leur piégeage, peut conduire à des fortes teneurs, dépassant la valeur moyenne du fond géochimique local et potentiellement comparables à celles en lien avec les activités minières. Il est donc important de disposer de moyens permettant de discriminer les différentes sources pour un site d'étude précis et ainsi d'être en mesure de déconvoluer le signal du fond géochimique naturel de celui de la mine. Dans un tel contexte, les isotopes stables du Pb sont considérés comme une approche pertinente pour le traçage de contaminations diffuses d'origine minière.

Il existe quatre isotopes stables du Pb ( $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$ ). Les  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$  sont radiogéniques et sont issus respectivement de la chaîne de désintégration d' $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$ . Le  $^{204}\text{Pb}$  est quant à lui non radiogénique. Les formations uranifères présentent une signature isotopique en Pb bien distincte de celle de la moyenne de la croûte terrestre, du fond géochimique impacté ou non par le Pb industriel ou celui des essences. L'objectif de la thèse est de caractériser et quantifier les apports miniers à l'aide de l'étude des isotopes stables du Pb et des déséquilibres radioactifs naturels. Le site d'étude 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). Des analyses isotopiques de Pb des échantillons (sédiments, sols, eaux) seront réalisées par ICP-MS-HR. Un protocole analytique sera aussi mis en place. Les phases porteuses du Pb du minerai et la conservation de la signature isotopique lors des processus de transport et de dépôt seront étudiées. Enfin, nous envisageons de cartographier le flux de photons gamma d'origine minière qui permettrait d'illustrer la relation spatiale entre les mesures de rayonnement gamma et les analyses des isotopes stables du Pb.

## 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
École doctorale :	Université Grenoble Alpes / Terre Univers Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Tuteur de thèse :	Bérénice FROMENT
Directeur de thèse :	Pierre BOUE - ISTerre
Financement de thèse :	IRSN / ANR DARE

---

Les couches géologiques superficielles ont une influence sur le mouvement du sol lors d'un séisme. Certaines configurations géologiques, comme les anciennes vallées remplies de sédiments, sont propices à ces effets (appelés « effets de site »), pouvant mener à une augmentation de l'amplitude du mouvement sismique en surface et à l'allongement de sa durée. Il est donc important de prendre en compte ce phénomène dans l'évaluation de l'aléa sismique, comme le stipule la Règle Fondamentale de Sécurité RFS 2001-01 pour les installations nucléaires. Le SCAN/BERSSIN étudie ces effets de site depuis plusieurs années, menant entre autres des études dans la zone du Tricastin (construite sur la paléo-vallée du Rhône). Dans le cadre du projet ANR franco-allemand DARE (2020-2023), plus de 400 capteurs sismiques ont été déployés dans cette zone afin d'analyser les effets de site en exploitant le « bruit sismique ». Ce bruit correspond aux faibles vibrations de la surface de la Terre, générées par des activités naturelles ou anthropiques, et ayant pour caractéristique d'être permanentes. Ainsi, le bruit sismique constitue une source de données exploitable, même en région de faible sismicité.

Cette thèse s'inscrit dans le projet DARE et vise à exploiter le jeu de données recueilli par ces 400 capteurs pendant 1 mois d'acquisition. L'objectif principal est d'étudier le potentiel du bruit sismique et l'apport d'un réseau dense de capteurs dans l'estimation des effets de site. Ce travail de thèse se compose de deux parties majeures : (1) l'estimation de l'amplification qui serait observée dans la vallée du Tricastin en cas de séisme ; (2) la caractérisation de la propagation d'ondes au sein de celle-ci. Pour la première partie, la densité du réseau permettra de cartographier la variabilité spatiale de l'amplification et d'étendre à un jeu de données dense, les méthodes basées sur le bruit sismique développées au cours de la thèse de Vincent Perron (IRSN-CEA-ISTerre ; 2013-2017). La seconde partie consiste à comprendre de quelle façon cette structure géologique modifie le comportement des ondes. Pour ce travail de thèse, des ressources de calcul de l'IRSN et de l'université de Grenoble sont mis à disposition. Par ailleurs, je bénéficie de l'expertise de Pierre Boué (directeur de thèse, ISTerre) dans ce domaine et de la collaboration franco-allemande au sein du projet DARE. Pour l'heure, je suis en train de procéder au contrôle qualité des données, nécessaire à une exploitation optimale de ce jeu de données dense.

## SUJET DE LA THÈSE

## Démélange spectral parcimonieux par fusion de données spatiales et/ou temporelles pour la détection rapide d'événements radiologiques par spectrométrie gamma

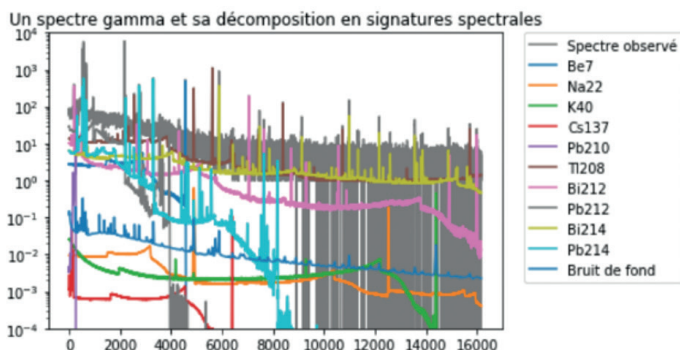
Doctorant :	Paul MALFRAIT
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Sciences et technologie de l'information et de la communication
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SAME / LMRE
Tuteur de thèse :	Anne DE VISMES-OTT
Directeur de thèse :	Jérôme BOBIN – CEA Saclay
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. Dans le cadre de la surveillance radiologique, en support à la recherche en radioécologie ou en cas d'incident ou accident.

En proposant de nouvelles approches en spectrométrie gamma afin de développer des outils d'analyse plus sensibles et donc plus rapides, les travaux de thèse s'inscrivent dans les questions scientifiques prioritaires de l'IRSN No. 2 et 4 du domaine de la radioprotection. Cette thèse répond également à la volonté de l'IRSN de valoriser les données issues de la surveillance de la radioactivité de l'environnement en s'appuyant sur les mesures de routine réalisées dans le passé par le laboratoire.

Ces travaux prennent la suite de la thèse de Jiaxin XU qui a développé des algorithmes de démelange spectral pour l'analyse des spectres gamma. On peut imaginer un tel spectre comme une combinaison linéaire de signatures spectrales. Celles-ci sont les histogrammes des dépôts d'énergie sur le détecteur par les photons émis lors des désintégrations des radionucléides, le tout ajouté à un bruit de fond rendant le démelange d'autant plus complexe. Le but des algorithmes est donc d'expliquer au mieux les spectres que l'on observe lors des mesures de radioactivité dans l'environnement.

L'idée de l'algorithme de démelange de Jiaxin XU est d'analyser le spectre globalement et non seulement aux pics d'énergie. Cette analyse globale, sur toute la gamme en énergie du spectre, permet de gagner en information et donc en précision. Ma thèse porte sur la généralisation de cet algorithme pour l'analyse conjointe de plusieurs spectres gamma afin d'utiliser, de plus, l'information temporelle et spatiale dans le but d'améliorer l'efficacité du démelange spectral. L'utilisation de cette information issue soit de mesures successives (voire en continu), soit de mesures simultanées en différents points de prélèvement, permettra de gagner encore en sensibilité, en rapidité et en précision dans l'analyse des spectres gamma. Ceci étant particulièrement intéressant sur la mesure de prélèvements d'aérosols lors d'événements critiques, d'incidents ou d'accidents.



## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Zeinab MAWASSY
Date du début de la thèse :	16/11/2020
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV/SRTE/LR2T
Tuteur de thèse :	Pascale HENNER / Severine LE DIZES-MAUREL
Directeur de thèse :	Jérôme ROSE - CEREGE
Financement de thèse :	IRSN

Following normal/incidental releases of nuclear facilities, radionuclides may reach the atmosphere under different speciation (gaseous, particulate, dissolved in water), be intercepted and retained by plant foliage and translocated to other organs. In the upcoming years, new release scenarios (ITER, UNGG dismantlement) potentially involving particles will be evaluated, thus increasing the need to assess/ improve the existing tools describing transfers and dosimetric evaluation. Knowledge on foliar transfer is still limited and operational tools do not consider the particulate form leading to possible dose underestimation. So, within D3P10 axis program, this PhD work aims at quantifying and modelling the key processes influencing particulate radionuclide transfers to plants by foliar pathway.

Particles covers a wide range of scenarios depending on nature, size and reactivity. At leaf interface, radionuclides may be incorporated by stomatal or cuticular pathways, then possibly reaching conductive tissues. The extent of these processes will depend on the possible dissolution of particles on/within foliage, or intact particles transfer. Yet the conditions (particle size limits, properties) and mechanisms for intact particles are unknown, thus requiring investigation of both incorporation pathways in relation to particle properties. The resulting radionuclide stocks and fluxes have to be quantified and compared to non-particulate source terms and finally, models have to be tested and/or specifically parametrized and/or completed to allow the global assessment of foliar transfer whatever the transfer pathways.

To answer these different questions, the project will consist of:

- 1) Controlled conditions experiments to obtain data on the plant incorporation-leaf absorption through transcuticular/stomatal pathways and translocation as a function of main following factors: plants characteristics (like foliage interface physico-chemical and morphological criteria: roughness, cuticle thickness, stomatal density and size), particles characteristics (low/high reactive particles with variety of sizes ranging from nano [20-50 nm] to micrometer [ $>5 \mu\text{m}$ ]), or type of deposit (dry/wet). Monitoring of contaminant absorption in/translocation out in leaves will be followed qualitatively/quantitatively by different techniques: e.g. assessing particles locations by 2D and 3D imaging (SEM-EDX, micro-X-ray fluorescence, micro and nano-Xray tomography).
- 2) Development and validation of a simple generic model of radionuclides foliar transfer, potentially including specific treatment for small diameter/low reactivity particles. Data acquired would be compared to aggregated transfer factor predictions and outputs of other generic models treating non-particle source terms. Based on results of comparisons, existing tools will be completed if needed.
- 3) Numeric application to a real-case scenario possibly attempted for ITER/ UNGG-like scenario with tritiated or  $^{36}\text{Cl}$  particles dispersion, respectively.

## SUJET DE LA THÈSE

## Modélisation du transfert des radionucléides dans les réseaux trophiques du Golfe du Lion

Docteurant :	Thomas SEYER
Date du début de la thèse :	15/10/2020
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Tuteur de thèse :	Sabine CHARMASSON
Directeur de thèse :	Rodolfo GURRIARAN - IRSN
Financement de thèse :	IRSN / Région PACA

Les incidents de Tchernobyl et Fukushima ont démontré la nécessité d'approfondir nos connaissances sur le devenir des radionucléides d'origine anthropiques dans l'environnement, à la fois pour des enjeux environnementaux et sanitaires.

D'importants efforts de recherches en radioécologie ont été menés depuis de nombreuses années. Cependant, ces efforts se sont surtout concentrés sur une approche « espèce par espèce », qui bien que très utile, montre ses limites lorsque l'on considère un écosystème dans son ensemble (ampleur des prélèvements nécessaires, ect...).

Ces dernières années, des études avec une approche plus globale se sont multipliées et c'est dans ce contexte que s'inscrit ma thèse. En effet, le but ici est de considérer le transfert des radionucléides au sein d'un réseau trophique marin, en y incluant les pêcheries, dans le contexte d'un incident nucléaire survenant sur le Rhône. Vu la grande échelle spatio-temporelle que représente cette étude, la modélisation numérique est l'outil qui a été retenu, avec l'utilisation du logiciel Ecopath with Ecosim.

La première étape de cette thèse est donc de construire un modèle écotrophique, baptisé GOLE4M (Gulf of Lion Ecopath, Ecosim, Ecospace, Ecotracer Model). Construit en collaboration avec le MIO (Marseille), il se veut être un outil fonctionnel, d'une précision supérieure aux rares modèles existants pour la région. Grâce à l'intégration des modules Ecosim et Ecospace permettant de rendre la représentation du réseau trophique dynamique et spatialisée, GOLE4M devrait être utilisé dans plusieurs projets en plus de cette thèse, notamment en écotoxicologie et en évaluation d'impacts environnementaux.

La deuxième étape de ce projet consistera à paramétrer le module Ecotracer, qui simule le transport des contaminants dans les réseaux trophiques, de façon adaptée aux radionucléides et à coupler le modèle avec un modèle hydrodynamique, qui permettra d'évaluer la dispersion physique des contaminants. On pourra ainsi étudier différents scénarii de rejets, la réponse associée de l'écosystème marin et les éventuelles recommandations sanitaires qui seraient adaptées, notamment en matière de gestion des pêches.

## SUJET DE LA THÈSE

**L'inversion robuste comme outil d'intégration de l'aléa inondation – Application à l'impact des brèches (défaillances des digues artificielles et naturelles) dans les analyses probabilistes d'inondation**

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

Les exploitants nucléaires doivent tenir en compte des 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. Aussi bien pour des inondations maritimes que fluviales, le niveau d'eau de référence 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).

L'idée est de se baser sur 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  $\alpha$ .

Les questions de recherche soulevées sont alors :

1. Comment représenter l'ensemble d'excursion lorsqu'il y a plus de 2 variables contrôlées ou lorsque certains aléas sont moins bien caractérisés ? Les tracés en coordonnées parallèles seront considérés et la relation entre les lignes d'isoprobabilités et des tirages de l'ensemble d'excursion aléatoire seront théoriquement abordés.
2. Chaque appel au simulateur est très coûteux en temps de calcul, ce qui complique la réalisation de l'inversion. Des techniques de métamodélisation (krigeage) seront utilisées. L'idée est de remplacer les simulations numériques par un modèle de substitution qui interpole quelques résultats de simulations bien choisis pour réduire l'incertitude dans l'identification de l'ensemble d'excursion.
3. L'inversion réalisée doit être robuste au sens où elle tient compte du caractère aléatoire et rare des forçages naturels. De précédents travaux (Richet et Bacchi 2019) intégrant les variables incertaines à travers une approche du pire scénario envisageable vont être généralisés pour intégrer une vision probabiliste.
4. Les variables profondément incertaines doivent être incluses dans le cadre probabiliste décrit précédemment. L'inversion va ainsi être combinée avec une optimisation afin d'évaluer ici le pire scénario relativement à ces variables, *i.e.* celui qui mène à la plus grande probabilité d'inondation.

## SUJET DE LA THÈSE

## Modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie

---

Docteurant :	Déo-Gratias Kily SOURABIE
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences de l'environnement
Laboratoire d'accueil :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Tuteur de thèse :	Didier HEBERT
Directeur de thèse :	Denis MARO - IRSN
Co-directeur :	Lucilla BENEDETTI - CEREGE
Financement de thèse :	IRSN / EDF

---

Le chlore 36 ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $T_{1/2} = 301\,000$  ans) est un radionucléide d'origine naturelle produit par spallation et activation neutronique dans l'atmosphère, et d'origine artificielle émis lors des essais nucléaires et produit pendant l'exploitation des réacteurs UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) par activation du chlore 35. Il est susceptible d'être mesuré dans les effluents et déchets générés par les opérations de démantèlement et fait donc partie des radionucléides présents dans le spectre de rejet des scénarios accidentels des rapports de sûreté des centrales en démantèlement. Une fois libéré dans l'atmosphère, le  $^{36}\text{Cl}$  (gaz et particules) peut atteindre le sol par des dépôts secs ou humides. Cependant, les connaissances sur ces dépôts sont très parcellaires, et de ce fait, il n'existe pas de modélisation robuste des processus qui les contrôlent. Or, du fait de sa mobilité relativement élevée dans la géosphère 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.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est la quantification puis la modélisation du dépôt par temps sec et par temps humide du  $^{36}\text{Cl}$ , pouvant être émis de façon accidentelle (démantèlement) mais aussi chroniques (Orano La Hague), sur une prairie en tenant compte principalement des paramètres liés au couvert et à la turbulence atmosphérique. Cette thèse est réalisée en partenariat avec EDF/DIPPE et le CEREGE. Les résultats obtenus et les connaissances acquises serviront à l'amélioration de la caractérisation des transferts du  $^{36}\text{Cl}$  dans l'environnement et pourront être intégrés dans des modèles comme SYMBIOSE (rejets chronique) ou C<sub>3</sub>X (rejets accidentels).

Ce projet repose d'abord sur des expérimentations *in situ* afin d'obtenir des données sur les concentrations de  $^{36}\text{Cl}$  dans l'atmosphère (air, eau de pluie) et déposées par dépôts secs et humides. Les prélèvements sont réalisés sur la plateforme technique IRSN La Hague (PTILH) situé sous les vents dominants de l'usine d'Orano, émetteur chronique de  $^{36}\text{Cl}$ . Le végétal étudié est l'herbe représentative des prairies car constituant un maillon de la chaîne alimentaire de l'homme via le lait de vache. Le chlore total est mesuré par chromatographie ionique tandis que le  $^{36}\text{Cl}$  est mesuré par AMS (Accelerated Mass Spectrometer) au CEREGE. A partir de ces données, des paramètres atmosphériques et du couvert, une modélisation des dépôts sera réalisée pour le chlore particulaire et le chlore gazeux (inorganique, organique) par adaptation des modèles existants et validés.



# SESSION POSTERS

## DOCTORANTS 1<sup>RE</sup> ANNÉE PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

### ► UNITÉ DE RECHERCHE - SANTÉ

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

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

**Youness EL-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.

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

**Mohamed yassir ERRAHMANI** - Arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein : étude à partir des données médico-administratives de l'assurance maladie.

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

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

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

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

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

**Ahmad SLEIMAN** - Conséquences biologiques de l'irradiation mitochondriale des neurones chez le nématode *C. elegans*.

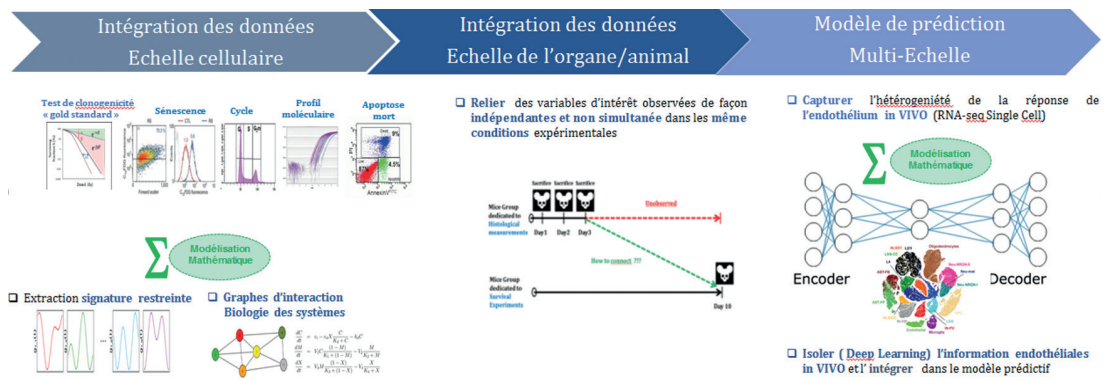
**Yann THIBAUT** - Modélisation de l'évolution des dommages précoces radio-induits au sein d'une population cellulaire.

SUJET DE LA THÈSE

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

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

Chaque année, plus de 200 000 patients sont traités par radiothérapie en France. Afin d'optimiser l'équilibre bénéfique (contrôle tumoral) / risque (toxicité tissus sains), de nombreux efforts ont été faits pour délivrer une dose maximale à la tumeur tout en épargnant les tissus sains via des traitements de planification variés et sophistiqués. Cependant, les effets biologiques de ces nouvelles procédures d'irradiation caractérisées par des doses, des volumes, des énergies et des débits très différents sont relativement inconnus. En milieu clinique, la dose prescrite intègre la mesure de l'efficacité biologique relative (EBR) afin de comparer l'impact des différents protocoles de fractionnement. Actuellement, les EBR sont dérivés du modèle linéaire quadratique qui relie la dose absorbée à la fraction de cellules survivantes mesurée par un essai clonogénique. Cependant, les mesures d'EBR basées sur un essai clonogénique ne prennent pas en compte certains changements phénotypiques des cellules survivantes qui contribuent à l'apparition d'effets indésirables pour des tissus sains induits par le rayonnement. Le programme de recherche ROSIRIS (Radiobiologie des Systèmes Intégrés pour l'optimisation des traitements par rayonnements ionisants et évaluation du RISque associé), initié à l'IRSN depuis 2012, vise à améliorer les connaissances biologiques sur les complications de la radiothérapie par une approche intégrant des compétences en micro et nano-dosimétrie, radiobiologie, biologie des systèmes et radiopathologie.



L'objectif de ce projet de thèse est de développer un modèle mathématique multi-échelle permettant de prédire un risque macroscopique (survie, perte de poids, fibrose, etc.) à partir de covariables *in vitro* et *in vivo* d'axes 2 (échelle moléculaire et cellulaire) et axe 3 (de l'échelle de l'organe au petit animal) du programme ROSIRIS. Dans un premier temps, une modélisation mathématique des mesures d'EBR dans de multiples configurations d'irradiation (Dose, Énergie, Flux, fractionnement, etc.) basée sur différentes entités biologiques (survie clonogène, sénescence, viabilité et cycle cellulaire, signature moléculaire « omique ») sera menée pour décrire leur dynamique temporelle et quantifier l'impact de différents paramètres d'irradiation. Une signature « restreinte » sera alors déduite afin de guider les prochaines acquisitions expérimentales. Les différentes composantes de cette signature restreinte seront ensuite intégrées dans un modèle mathématique pour une évaluation des risques de complications habituellement observées dans les expériences sur petits animaux (survie et mortalité, fibrose, etc.). Enfin, l'impact de la variabilité intercellulaire sera quantifié à partir de données de séquençage sur cellule unique (Single-Cell) et intégré dans les prédictions du modèle.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Antonin DESCHEMPS
Date du début de la thèse :	01/10/2020
École doctorale :	Rennes 1 / Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SERAMED / LRAcc & SERPICO
Tuteur de thèse :	Mohamedamine BENADJAOUD
Directeur de thèse :	Charles KERVRANN - Inria
Financement de thèse :	IRSN / Inria

---

Suite à une irradiation, il est possible d'évaluer la dose reçue à partir du dénombrement d'aberrations chromosomiques dans des métaphases acquises par cytogénétique conventionnelle.

Cependant, le dénombrement des aberrations est pour le moment manuel (ou semi-automatisé), ce qui est très couteux en temps d'expertise. Dans un contexte d'une exposition accidentelle d'un grand nombre de personnes, il pourrait être difficile d'offrir une dosimétrie rapide et fiable pour toutes les victimes.

Cette thèse vise donc à valoriser les avancées récentes en vision par ordinateur et en apprentissage machine pour automatiser ce dénombrement. Nous nous appuyons sur les réseaux de neurones convolutionnels profonds qui ont démontrés leur potentiel pour localiser ou classifier des objets dans des images.

Au cours de cette thèse, nous utiliserons ces modèles, tout en tenant compte des spécificités de la base de données du LRAcc : cette dernière ne contient pas d'annotation spatiale, uniquement un nombre d'aberration. Il faudra par conséquent investiguer des méthodes capables d'exploiter de grands volumes de données qui ne sont pas annotées. Cette situation relève typiquement du contexte de l'apprentissage semi-supervisé.

Nous chercherons donc à classer chaque chromosome présent sur une image de métaphase en deux classes : monocentrique (sain) ou dicentrique (aberrant). Au cours de cette thèse, nous proposerons une démarche pour quantifier le niveau de confiance à accorder au modèle dans sa tâche de classification.

Durant la première partie de thèse, une étude de la littérature permettra de sélectionner des approches relevant de l'apprentissage profond pour résoudre le problème posé. Plus particulièrement, la littérature récente traitant de la question de l'apprentissage semi-supervisé, permettra de valoriser la base de données du LRAcc (~100k images), partiellement annotée. Nous évaluerons et comparerons leurs performance, jusqu'à aboutir à une classification satisfaisante pour l'automatisation de la procédure.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous nous intéresserons à la caractérisation du niveau confiance des modèles de prédiction. Nous envisageons de fournir des indicateurs permettant aux utilisateurs de porter leur attention sur des situations requérant une expertise humaine.

Enfin, un dernier objectif visera à quantifier l'impact de l'incertitude de classification sur celle de l'estimation de la dose reçue. Une période de quelques mois sera consacrée à la rédaction du manuscrit de thèse.

## 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

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

La modélisation numérique de la dispersion atmosphérique est un outil indispensable pour prévoir les conséquences sanitaires et environnementales des rejets accidentels de radionucléides dans l'atmosphère, afin d'anticiper les contre-mesures nécessaires à la protection des populations. Cependant, les estimations de ces modèles sont entachées d'incertitudes significatives. La prévision météorologique est une source d'incertitudes notable ; pour les caractériser, il est commun d'adopter une approche de modélisation d'ensemble où la génération d'un ensemble de simulations (appelées "membres"), au lieu d'une seule, permet de faire des prévisions météorologiques probabilistes. Utiliser une approche probabiliste pour la dispersion est nécessaire afin de mieux prendre en compte les incertitudes en situation de crise. Toutefois, l'utilisation directe des ensembles construits pour la prévision météorologique dans les modèles de dispersion a montré ses limites sur des cas tels que Fukushima, n'étant pas nécessairement représentatifs des incertitudes sur les variables d'intérêt pour la dispersion.

Cette thèse a trois objectifs : Premièrement, proposer des méthodes de calibrations des ensembles météorologiques pour les rendre plus représentatifs de l'incertitude et plus adaptés aux variables et échelles considérées, en utilisant les observations issues de la base de données météorologiques de Météo-France et le lidar de l'IRSN. Ensuite, le deuxième objectif est de répondre à la question quant à la continuité temporelle des membres d'ensembles successifs pour couvrir des périodes relativement longues. Enfin, sachant que l'utilisation des ensembles est, généralement, coûteuse en temps de calcul, le troisième objectif est de réduire le nombre de membres de l'ensemble en gardant les membres les plus représentatifs.

Pour répondre à cette problématique, les sorties du modèle de prévision d'ensemble PEAROME de Météo-France seront évaluées et utilisées à l'entrée du modèle de dispersion à courte distance pX développé par l'IRSN. Ensuite, les estimations de pX seront comparées à des mesures radiologiques dans le cadre d'une campagne de mesures de <sup>85</sup>Kr menée par l'IRSN autour de l'usine Orano NC de La Hague afin d'évaluer l'apport de l'ensemble météorologique pour la dispersion.

## 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
École doctorale :	Université Paris-Saclay / PHENIICS
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SDOS / LDRI
Tuteur de thèse :	Christelle HUET
Directeur de thèse :	Christelle HUET - IRSN
Co-directeur :	Régine GSCHWIND – Université Bourgogne Franche-Comté
Financement de thèse :	IRSN

La radiothérapie guidée par l'imagerie doit permettre à terme d'améliorer la précision des traitements délivrés aux patients, en augmentant le contrôle tumoral et en réduisant l'exposition des tissus sains aux rayonnements. L'IRM-LINAC combine un accélérateur linéaire (LINAC) utilisé pour la production des rayons X et un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM), offrant un bon contraste des tissus mous qui permet un suivi en direct de la tumeur et des organes sains au cours du traitement. Cependant, la présence du champ magnétique de l'IRM impacte les mesures des caractéristiques du faisceau ainsi que les distributions de dose dans le patient. L'objectif principal de la thèse est donc de développer des outils dosimétriques associés à des protocoles robustes utilisables sur les appareils de type IRM-LINAC afin d'améliorer la connaissance des doses délivrées aux patients traités avec ces appareils, enjeu identifié dans le rapport IRSN/2019-00335 présentant les démarches de recherche pour la période 2017-2022. Il s'intègre dans la question prioritaire N°5 « Comment mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques ? » de la stratégie scientifique de l'IRSN.

La thèse se concentrera, d'une part, sur l'étalonnage des faisceaux des IRM-LINAC et plus particulièrement sur le développement de méthodes dosimétriques pour réaliser la mesure du facteur d'ouverture du collimateur (FOC), et, d'autre part, sur l'évaluation des distributions de dose 2D et 3D délivrées par ce type d'appareils.

Les outils dosimétriques et protocoles développés seront basés sur l'utilisation de films radiochromiques et de gels dosimétriques, pour lesquels il sera au préalable nécessaire de caractériser la réponse en présence du champ magnétique. A l'aide des protocoles développés, les éventuels facteurs correctifs à appliquer aux mesures de FOC réalisées avec plusieurs détecteurs actifs (chambres d'ionisations, diodes) seront déterminés. Puis, les résultats expérimentaux seront confrontés à ceux de simulations Monte-Carlo réalisées avec le code de calcul Geant4. Les distributions de dose seront évaluées à l'aide des outils développés, dans et hors du champ d'irradiation, à l'aide de fantômes anthropomorphes. Finalement, les performances des systèmes de planification de traitement utilisés en clinique seront évaluées.

Les différentes campagnes de mesures au cours de la thèse seront réalisées sur l'IRM-LINAC MRIdian du Centre Georges François Leclerc de Dijon.

## SUJET DE LA THÈSE

**Arrhythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein : étude à partir des données médico-administratives de l'assurance maladie**

Doctorant :	Mohamed yassir ERRAHMANI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
École doctorale :	Université Paris-Saclay / École Doctorale de Santé Publique
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Sophie JACOB
Directeur de thèse :	Marie-Odile BERNIER - IRSN
Co-directeur :	Jean FERRIERES - INSERM
Financement de thèse :	Bourse doctorale - Université Paris-Saclay

**Contexte :**

La radiothérapie est actuellement un standard de prise en charge des cancers du sein. Cependant, elle entraîne une irradiation cardiaque, et des études ont mis en évidence un lien avec la survenue de maladies cardiovasculaires à moyen et long terme, ou à plus court terme, notamment avec l'étude BACCARAT conduite par l'IRSN. Néanmoins, il existe très peu de données spécifiques concernant les arrhythmies cardiaques et troubles de la conduction.

Dans ce contexte, nous allons dans cette thèse évaluer si la radiothérapie dans le cadre du traitement pour un cancer du sein est associée à un risque accru d'arythmies cardiaques et troubles de la conduction nécessitant une prise en charge spécifique telle que l'implantation d'un stimulateur cardiaque ou un traitement anti arythmique invasif.

Pour répondre à cet objectif cette thèse sera divisée en trois parties :

- 1 - Évaluer si l'incidence d'arythmie cardiaque chez les patientes traitées par radiothérapie (RT) pour un cancer du sein est plus élevée que dans la population générale.
- 2 - Comparer le risque de survenue d'arythmies cardiaques en fonction du type de traitements adjuvants du cancer (RT, chimiothérapie, hormonothérapie, immunothérapie, ...)
- 3 - Étudier la relation dose-réponse entre le risque d'arythmies cardiaques et la dose absorbée par le cœur au cours d'une radiothérapie.

**Programme de la thèse :**

- 1 - La première partie s'appuie sur les données médico-administratives de l'Echantillon Généraliste de Bénéficiaire – EGB du SNDS. Les données de près de 3500 patientes traitées pour un cancer du sein (dont 80% traitées par RT) entre 2008 et 2016 sont analysées pour comparer le nombre de cas incidents de PM observés chez les patientes traitées par RT du sein au nombre de cas de PM qui seraient attendus en population générale.
- 2 - La seconde partie portera sur la cohorte Cancer du Sein de l'InCA (Institut national du Cancer) comprenant les données médico-administratives de plus de 200 000 patientes depuis 2010, permettant d'évaluer par une analyse des données longitudinales, l'impact de la RT par rapport aux autres traitements du cancer sur le risque d'arythmie, notamment d'implantation de PM, et prendre en compte des facteurs de risque tels que l'hypertension ou le diabète.
- 3 - Enfin, la relation dose-réponse sera analysée à partir d'une étude cas-témoins nichée dans une cohorte clinique de près de 4000 patientes traitées par RT pour un cancer du sein (2009-2015, étude CAMBRIA). Les événements d'arythmies jusqu'en 2020 seront obtenus par croisement avec les données de l'assurance maladie. La dosimétrie cardiaque précise sera réalisée pour les cas et leurs témoins.

## SUJET DE LA THÈSE

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

Doctorant :	Marie FREREJACQUES
Date du début de la thèse :	02/11/2020
École doctorale :	Université Paris-Saclay/ Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE/SESANE/LRSI
Tuteur de thèse :	Yann GUEGUEN
Directeur de thèse :	Yann GUEGUEN - IRSN
Co-directeurs :	Thierry HAUET & Clara STEICHEN - INSERM
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 est très limitée. Elle permettrait d'améliorer l'évaluation des risques radiotoxicologiques pour la santé humaine en facilitant les extrapolations de fortes à faibles doses. Ce projet s'inscrit ainsi dans les objectifs du groupe thématique de recherche GRT4 « Radiotoxicologie des expositions chroniques ou répétées ». L'AOP est un outil conceptuel permettant de rassembler les connaissances sur le(s) lien(s) entre un ou des évènement(s) moléculaire(s) initiateur(s) et un effet délétère visible au niveau d'un organisme. 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 complexité du rein en reproduisant sa structure et sa fonctionnalité. Moins éloigné génétiquement qu'un modèle animal, ce modèle expérimental novateur offre la possibilité d'approfondir la compréhension des mécanismes physiopathologiques rénaux. Allié au concept d'AOP, ce modèle organoïde rénal sera appliqué à l'étude de la néphrotoxicité de l'uranium dans le but d'améliorer l'évaluation des risques sanitaires consécutifs aux expositions professionnelles et environnementales par contamination interne. A terme ces outils pourront être utilisés pour d'autres radionucléides ou dans le cadre d'expositions multiples.

Ce projet intègre plusieurs collaborations : l'une avec l'équipe INSERM-IRTOMIT spécialisée dans la génération d'organoïdes rénaux, et l'autre avec des équipes canadiennes, Health Canada et CNL, pour la construction de l'AOP de l'uranium. La première étape a donc été l'acquisition des méthodes spécifique de culture 3D au sein du laboratoire partenaire. Les étapes suivantes sont dédiées au transfert technique du modèle organoïde à l'IRSN et à l'étude bibliographique des voies moléculaires impliquées dans la réponse cellulaire et tissulaire à l'uranium. L'étude des effets néfastes de l'uranium sera réalisée avec, notamment, la détermination des conditions d'expositions (temps, dose), une étude globale par analyse transcriptomique et par analyse phénotypique afin d'évaluer la réponse générale du modèle à l'uranium. Ensuite, l'étude des événements moléculaires initiateurs et des événements clés moléculaires et cellulaires sera effectuée au regard des connaissances WikiAOP et de la littérature. En parallèle, une étude par SIMS et ICP-MS permettra de localiser et de quantifier l'uranium au niveau cellulaire. 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 clé identifiés et leurs relations permettront de construire le réseau AOP de la néphrotoxicité de l'uranium.

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

Depuis les années 60, la radiologie interventionnelle, acte guidé par une imagerie de rayons X de basse énergie (70-120 kV), est couramment utilisée pour le diagnostic et le traitement de différentes pathologies (cardiaques ou neurologiques...). En France, on compte plus de 600 000 actes par an et ce nombre est en constante augmentation. En effet, cette technique, beaucoup moins invasive que la chirurgie, permet de diminuer les complications et la durée d'hospitalisation du patient. Cependant, la complexité de la procédure (durée d'exposition, répétition de l'acte, corpulence du patient...) peut conduire à une dose absorbée importante et dans certains cas, à l'apparition d'effets déterministes allant de l'érythème à la radionécrose des tissus. Entre 2007 et 2013, l'ASN a recensé 78 ESR (Evènements Significatifs en Radioprotection) soit 3% du nombre d'ESR total dans le domaine médical, les risques associés à cette pratique sont donc non négligeables.

Ainsi l'enjeu de la thèse consiste à caractériser les effets biologiques de ce type d'exposition sur les tissus, notamment sur les tissus osseux, très complexes à traiter lors de forte surexposition, afin de caractériser les spécificités radio-pathologiques de ce type de brûlures, d'en identifier les causes et ainsi de contribuer à l'amélioration de la prise en charge des patients et la prédiction des risques de complications.

Grâce à l'acquisition de l'irradiateur petit animal SARRP (Small Animale Radiation Research Platform) et au développement d'un nouveau modèle préclinique, il est maintenant possible de mimer les conditions d'exposition de la radiologie interventionnelle chez la souris. L'objectif de cette thèse est de caractériser ce nouveau modèle, à différents temps post-irradiation, d'un point de vue physique (dosimétrie, imagerie, modélisation) et biologique (suivi lésionnel, histologie) en évaluant : l'impact de l'irradiation (effet dose), du protocole (exposition unique ou répétée) et de la réponse biologique (remodelage osseux). Pour cela des mesures par spectroscopie RPE (Résonance Paramagnétique Electronique) seront réalisées afin de quantifier la dose réellement absorbée par l'os et d'évaluer l'impact de la réponse biologique sur le signal détecté (remodelage osseux). La quantification des lésions radio-induites sera réalisée grâce à l'acquisition d'images microscanner sur le Quantum GX2 (imageur haute résolution dédié au petit animal) et à des mesures histologiques afin d'évaluer les modifications de l'architecture osseuse et vasculaire. Enfin, des simulations Monte Carlo avec le code Geant4 seront réalisées afin de caractériser précisément le dépôt de dose et le parcours des électrons secondaires dans les différents tissus dans les conditions d'irradiation du modèle.



## SUJET DE LA THÈSE

## Modification du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser la transplantation de cellules souches coliques

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

De nos jours, les cancers pelviens ont une prévalence élevée et sont majoritairement traités par radiothérapie. Bien qu'elle permette un contrôle tumoral, cette thérapie entraîne également une atteinte des tissus sains environnants, tel que le colon, pouvant conduire à long terme à des complications invalidantes. Le nombre et la complexité de ces séquelles ont amené à la définition d'une nouvelle maladie, la Pelvic Radiation Disease (PRD). Le développement de nouvelles 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 (CSM) pour traiter ces lésions radio-induites. Au niveau du colon, les CSM 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 à un microenvironnement ( $\mu$ E) inflammatoire post-irradiation.

Ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité de ces recherches et utilisera un modèle murin de PRD obtenu après irradiation colorectale unique de 26Gy.

La première étape de cette thèse sera l'étude du remodelage du  $\mu$ E colique à différents temps post-irradiation (précoces & tardifs). Cette étude se fera au niveau cellulaire par cytométrie en flux, au niveau moléculaire par analyse transcriptomique globale et par séquençage d'ARN sur cellule unique. Grâce à cette dernière technique, nous espérons identifier de nouvelles voies moléculaires impliquées dans la pathologie.

La seconde partie s'intéressera à l'impact du  $\mu$ E colique irradié sur le processus de régénération épithéliale. Pour cela, nous étudierons le développement d'organoides coliques en 3D en présence de cellules du  $\mu$ E irradiées. En effet, ce modèle de formation d'organoides en 3D à partir de cryptes coliques reflète parfaitement la prolifération des CSCs *in vivo* et donc le processus de régénération mis en place après irradiation. Cette technique permettra également de confirmer l'impact des voies moléculaires identifiées sur le processus de prolifération épithélial.

La dernière partie de la thèse aura pour but de tester l'efficacité de différentes molécules pharmaceutiques *in vivo*, pouvant avoir une action sur les voies identifiées précédemment, après injection à des souris irradiées. Ce traitement moléculaire d'intérêt sera ensuite associé à la transplantation de CSCs. Nous étudierons alors l'impact du traitement sur l'implantation des CSCs, ainsi que l'effet de cette transplantation sur la lésion radio-induite.

## SUJET DE LA THÈSE

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

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

Les études portant sur les expositions professionnelles aux rayonnements ionisants (RI) permettent d'étudier des expositions chroniques à faible doses, représentant les modes d'exposition les plus fréquents de la population générale.

Actuellement, les professionnels médicaux représentent la majorité des travailleurs exposés aux RI, soit environ 54 % de la population exposée. Leur exposition moyenne est relativement faible, de l'ordre de 0.22 mSv par an (rapport IRSN 2015). Néanmoins, il apparaît que certains professionnels sont plus exposés que d'autres, tels les cardiologues interventionnels et les professionnels des services de médecine nucléaire. Plusieurs publications ont mis en évidence des risques accrus de cataracte chez ces professionnels<sup>1</sup> ainsi que la survenue de plusieurs cas de tumeurs cérébrales chez des cardiologues interventionnels<sup>2</sup>. Cependant, le lien avec la pratique de procédure de cardiologie interventionnelle n'a pas été démontrée<sup>3</sup>.

Dans ce contexte, l'IRSN a mis en place une cohorte de professionnels médicaux exposés aux RI, la cohorte ORICAMS (Occupational Radiation-Induced Cancer in Medical Staff), qui inclut 220 000 travailleurs suivis entre 2002 et 2013 dans SISERI, le registre national de surveillance de l'exposition des travailleurs aux RI. En s'appuyant notamment sur les données de cette cohorte, l'objectif de la présente thèse est d'étudier le risque de cancer radio-induit chez les professionnels de santé, et principalement le risque de tumeur cérébrale suite à une exposition professionnelle aux RI d'origine médicale.

Au cours de cette thèse, le premier axe consistera à réaliser une étude bibliographique exhaustive des risques neurologiques, incluant les tumeurs cérébrales bénignes et malignes en rapport avec l'exposition aux RI. Le deuxième axe portera sur le calcul de SMR (Standardized mortality ratio) dans l'analyse de la mortalité au sein de la cohorte ORICAMS, laquelle sera comparée à celle de la population générale (pour des pathologies cancéreuses ou non cancéreuses). Le troisième axe consistera à estimer le risque de décès par cancer du cerveau, avec quantification de la relation dose-réponse et évaluation de l'existence de facteurs confondants éventuels (âge à l'exposition, sexe, facteurs de prédisposition...) par le biais d'une étude cas-témoin nichée dans la cohorte ORICAMS et par une analyse conjointe avec les données de cohortes Américaine et Coréenne.

La finalité de ce travail sera d'améliorer la connaissance des risques sanitaires radio-induits des professionnels médicaux exposés aux RI et, *in fine*, les normes de radioprotection pour cette population de travailleurs.

1. Bernier, M.-O. *et al.* Cataract Risk in a Cohort of U.S. Radiologic Technologists Performing Nuclear Medicine Procedures. *Radiology* 286, 592–601 (2018).

2. Roguin, A. *et al.* Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am. J. Cardiol.* 111, 1368–1372 (2013).

3. Linet, M. S. *et al.* Mortality in U.S. Physicians Likely to Perform Fluoroscopy-guided Interventional Procedures Compared with Psychiatrists, 1979 to 2008. *Radiology* 284, 482–494 (2017).

## SUJET DE LA THÈSE

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

Docteurant :	Goran RIAZI
Date du début de la thèse :	05/10/2020
École doctorale :	Université Paris-Saclay / Département de Biologie Cellulaire et Moléculaire
Laboratoire d'accueil :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Directeur de thèse :	Hafid AIT OUFELLA – Paris Cardiovascular Center
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Les principales pathologies vasculaires sont liées aux complications de l'athérosclérose, pathologie la plus étudiée dans le cadre des effets d'une exposition à faibles doses de rayonnements ionisants. Aucune étude n'a exploré leur impact sur la pathologie de l'anévrisme aortique dont le facteur de risque principal est l'athérosclérose sévère. Ce projet répond à la question n°1 des questions scientifiques de l'IRSN, en particulier les effets des faibles doses sur l'appareil circulatoire. Question encore débattue et qui rentre dans les priorités de MELODI.

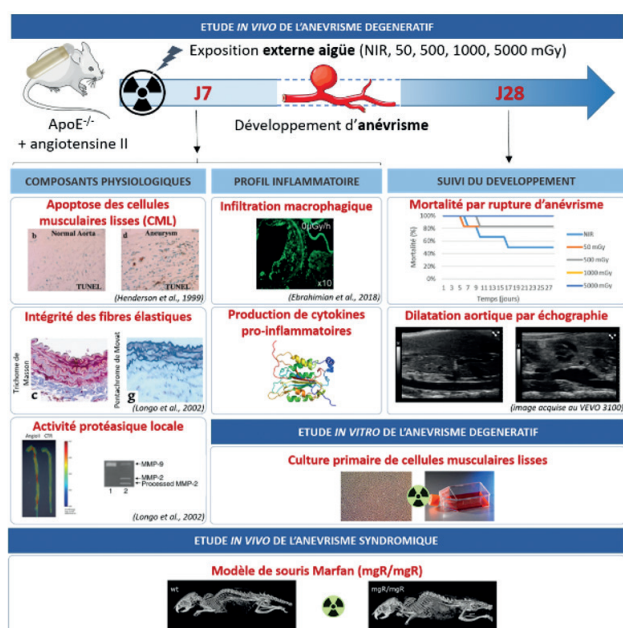
Les anévrismes se caractérisent par une dilatation focale et permanente de la paroi artérielle. On en reconnaît deux types : un dégénératif et un syndromique qui se distinguent par leurs mécanismes physiopathologiques et leur microenvironnement cellulaire. Ce projet a pour objectif d'explorer par une approche *in vivo* et *in vitro* la réponse des doses faibles à modérées/fortes sur les différents types d'anévrismes aortiques.

L'approche *in vivo* consiste à utiliser 2 modèles de souris pour mimer le développement des deux types d'anévrismes aortiques. Pour le dégénératif, un modèle de souris ApoE<sup>-/-</sup> hypertendus supplémentés en angiotensine II sera utilisé ; pour le syndromique, des souris sous-exprimant le gène FBN1 (mgR/mgR) permettront de reproduire cette pathologie.

Ces deux modèles seront exposés à différentes doses de rayonnements ionisants (50, 500, 1000 et 5000 mGy) selon un mode d'exposition aiguë externe. Différents paramètres seront étudiés : la fréquence d'apparition des anévrismes, la fréquence des ruptures, l'intégrité des constituants de la paroi vasculaire (apoptose des cellules musculaires lisses, densité en fibres élastiques, activité des protéinases) et le profil inflammatoire (infiltration macrophagique, production de cytokines).

L'approche *in vitro* permettra de mieux comprendre les mécanismes au niveau cellulaire en étudiant l'altération des fonctions des cellules musculaires lisses exposées à ces différentes doses de rayonnements ionisants.

L'IRSN possède toutes les structures nécessaires à la réalisation de cette thèse. Un irradiateur pour petit animal (SARRP), une plateforme pour le suivi échographique (VEVO), des laboratoires de biologie moléculaire et cellulaire pour l'analyse physiopathologique de l'anévrisme. L'étude du modèle de souris Marfan sera rendu possible grâce à la collaboration avec le centre de recherche cardiovasculaire qui possède l'élevage des souris Mgr/Mgr.



## SUJET DE LA THÈSE

Conséquences biologiques de l'irradiation mitochondriale des neurones  
chez le nématode *C. elegans*

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

Un des objectifs de l'IRSN dans son programme ROSIRIS, est la compréhension approfondie des effets indésirables induits par les rayonnements ionisants en radiothérapie. Cet objectif est rendu possible grâce à l'installation MIRCOM. Ces effets indésirables ont été étudiés depuis longtemps en partant d'un dogme central : l'ADN nucléaire est la principale cible des dommages radioinduits. Cependant, l'apparition des phénomènes tels que l'instabilité génétique et les effets bystander, a remis ce dogme en question. En effet, on s'est aperçu des interactions entre les rayonnements ionisants et des organites intracellulaires, particulièrement les mitochondries. Celles-ci occupent 20 à 40% du cytoplasme, constituent le centre énergétique de la cellule et jouent un rôle incontournable dans le métabolisme cellulaire.

Les études ont identifié des altérations quantitatives et qualitatives de l'ADNmt. Celui-ci, étant beaucoup plus radiosensible que l'ADN nucléaire, a montré des mutations et des délétions chez des patients traités par radiothérapie. Egalement, les complexes de la chaîne respiratoire permettant de produire l'ATP, peuvent être affectés, induisant un dysfonctionnement métabolique et du stress oxydatif, dû à la fuite d'électrons dans la chaîne de transport électronique mitochondriale.

Malgré l'importance de ce qui a été identifié, il y a eu peu d'études qui ont évalué la nature des dommages mitochondriaux dans des organismes modèles vivants ainsi que les conséquences de ces éventuelles altérations à l'échelle tissulaire. C'est dans cet esprit qu'on a posé les problématiques suivantes :

1. Quelles sont les conséquences moléculaires des rayonnements ionisants (les protons) sur les mitochondries des neurones du nématode *C. elegans* ?
2. Quelles seront les conséquences des altérations mitochondriales sur le fonctionnement du système nerveux, particulièrement le comportement et le vieillissement ?

Afin de répondre à ces questions nous allons irradier, avec des protons (4 MeV), les mitochondries des neurones de nématodes immobilisés dans des puces microfluidiques ultrafines adaptées à MIRCOM. L'étude des altérations se fera en analysant, entre autre, l'intégrité des mitochondries (dépolarisation mitochondriale), le stress oxydant (ROS, peroxydation lipidique...), la respiration cellulaire (Seahorse) et la quantification de l'ADNmt ainsi que les mutations par qPCR. La 2<sup>e</sup> étape consiste à étudier le comportement et la survie des nématodes en irradiant les mitochondries des voies spécifiques (olfactives et gustatives) influençant la longévité et des mutants pour des comportements tels que l'aversion du goût, l'accouplement et l'apprentissage. Dans toutes ces étapes, nous modéliserons, par le logiciel open source Geant-4, la dose délivrée en tenant compte de sa structure complexe par la construction des images 3D à partir des photos microscopiques des mitochondries des neurones.

## SUJET DE LA THÈSE

Modélisation de l'évolution des dommages précoces radio-induits  
au sein d'une population cellulaire

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

L'objectif de cette thèse est la modélisation du devenir d'une population cellulaire ayant été exposée à une irradiation. Cette thèse s'inscrit dans le programme de recherche de l'IRSN ROSIRIS (axe programme D3P7) visant à mieux connaître les mécanismes à l'origine des effets secondaires des radiothérapies et plus particulièrement dans l'axe 1 de ce programme, qui vise à établir la relation entre les caractéristiques physiques des rayonnements ionisants et les effets biologiques précoces. Dans le but d'améliorer les modèles de risque liés à l'utilisation des rayonnements ionisants en radiothérapie, un outil prédictif du risque associé à une exposition doit être construit en liant les étapes depuis les dépôts d'énergie issus des interactions des rayonnements ionisants jusqu'aux effets biologiques tardifs. Le travail de cette thèse est une contribution au développement d'un tel outil en mettant en lien les données produites dans l'axe 1 aux cours des dernières années avec celles de l'axe 2, qui a pour but la compréhension des événements moléculaires impliqués dans la réponse cellulaire. L'objectif principal est de passer de la caractérisation de la topologie des dommages radio-induits calculés à l'échelle d'une cellule aux temps précoces (microseconde post-irradiation) à la description de l'état du tapis cellulaire à des temps plus tardifs (heures post-irradiation).

Cette thèse s'appuie sur des outils développés au Laboratoire de Dosimétrie des Rayonnements Ionisants, à savoir un logiciel permettant de générer des géométries de noyaux (et tapis) cellulaires réalistes et une chaîne de simulation, basée sur le code Monte-Carlo Geant4-DNA, permettant la caractérisation nanodosimétrique des rayonnements ionisants dans le but d'évaluer les dommages radio-induits à l'ADN, identifié comme une cible critique. Cette thèse s'appuie, également, sur les données biologiques obtenues sur les plateformes d'irradiation AMANDE, SARP, ALPHEE et, prochainement, MIRCOM en les confrontant aux résultats issus de la modélisation. Pour répondre aux enjeux de cette thèse, des modèles de réparation cellulaire devront être étudiés puis implémentés. Dans le même temps, une méthode qui liera les concepts nanodosimétriques aux concepts microdosimétriques devra être développée afin d'extrapoler les résultats de la chaîne de simulation à l'échelle du tapis cellulaire. Pour cela, la chaîne de simulation devra également être améliorée et adaptée afin de profiter des évolutions du code Geant4-DNA sur lequel elle s'appuie et de fournir des résultats cohérents avec la méthode d'extrapolation envisagée. En parallèle, cette thèse permettra de préparer les futurs outils de prédiction en constituant une base de données exploitables avec les résultats générés tout au long des trois années de travail.



# SESSION POSTERS

## DOCTORANTS 1<sup>RE</sup> ANNÉE

### ► PÔLE DÉFENSE SÉCURITÉ ET NON PROLIFÉRATION

**Raphaël GAVART** - Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'Ondes de choc autour de Structures Type.

### ► PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**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.

**Uday CHIKKABIKKODU** - Modeling of combustion-turbulence interactions for the simulation of fires in confined and ventilated environments.

**Julien CLEMENT** - Caractérisation *in-situ* de l'interaction sol-structure (ISS) au travers de la mesure de la fonction d'impédance (FI).

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

**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 en galeries souterraines complexes : application à la maîtrise du risque incendie pour des configurations de stockage de déchets radioactifs.

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

**Julie NGUYEN-SADASSIVAME** - Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants.

**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.

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

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

**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.

## 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
École doctorale :	Université d'Orléans / Énergie - matériaux - sciences de la terre et de l'univers
Laboratoire d'accueil :	PDS-DEND / SESN / BMAX
Tuteur de thèse :	Sophie TRELAT - IRSN / Michel-Olivier STURTZER - ISL
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX – CNRS Orléans
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, forcément approchés, nécessitent d'être validés par des expériences réalisées à plusieurs échelles. En effet, les expériences à échelle réelle sont 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 différents obstacles, et des chargements mécaniques résultants à l'aide de mesures expérimentales précises, dans le but de développer ces modèles simplifiés pour évaluer l'effet atténuateur des obstacles. Cette thèse s'inscrit dans la continuité 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.

La thèse, supervisée par Nabiha Chaumeix du laboratoire ICARE (CNRS Orléans), s'inscrit dans la continuité des activités développées à l'IRSN depuis de nombreuses années et ayant pour objectif d'améliorer la connaissance des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle tridimensionnelle et différents obstacles, et des chargements mécaniques résultants à l'aide de mesures expérimentales précises, dans le but de développer des modèles simplifiés pour évaluer l'effet atténuant des obstacles. Les expériences, couplant des diagnostics rapides avancés, seront menées dans des installations caractérisées par des échelles différentes : (i) échelle réduite sur la table de détonation développée entre autres par Sophie Trélat, (ii) échelle plus grande en champ libre à l'ISL par Michel Sturtzer. Au cours de cette étude, des configurations complexes seront étudiées, notamment pour prendre en compte la présence d'un ou plusieurs obstacles hémicylindriques et leur interaction avec une onde de souffle générée par un explosif condensé. Les résultats obtenus durant ces campagnes permettront d'améliorer le modèle phénoménologique déjà développé par la coopération.





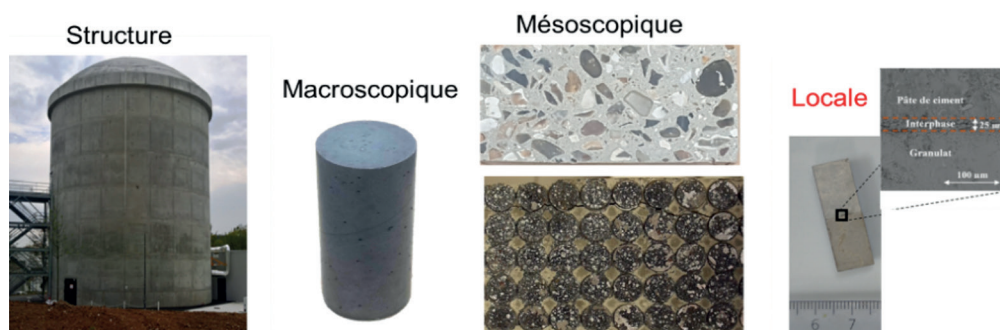
## SUJET DE LA THÈSE

## 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

Doctorant :	Sirine AL DANDACHLI
Date du début de la thèse :	13 / 10 / 2020
École doctorale :	Université de Montpellier/ Information Structures Systèmes
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Tuteur de thèse :	Céline PELISSOU
Directeur de thèse :	Frédéric JAMIN – LMGC Montpellier
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 laboratoire commun MIST (IRSN/CNRS/UM), du consortium scientifique CONCRETE et du projet ODOBA. Les sollicitations thermo-hydro-chimio-mécaniques que subissent les bétons des centrales nucléaires durant leur durée de vie provoquent leur dégradation, en diminuant leur temps d'exploitation et leur durabilité (tenue mécanique, étanchéité). L'un de ces mécanismes de vieillissement est la Réaction Sulfatique Interne (RSI). Cette pathologie fait l'objet de ces travaux de thèse en répondant à la sous-question 6.1 de la stratégie scientifique de l'IRSN : « Comment les sollicitations thermiques, chimiques et/ou mécaniques générées par les agressions dégradent-elles les barrières de confinement ? ».

L'objectif est ici d'améliorer la compréhension et la modélisation multi-échelle des mécanismes associés à la RSI, en partant de l'échelle de l'interface pâte de ciment /granulats (échelle dite locale) et en remontant jusqu'à l'échelle de l'éprouvette (échelle qualifiée de mésoscopique où la microstructure du béton est composée d'une collection de granulats agglomérés dans une matrice cimentaire et macroscopique).



Des expérimentations seront développées aux échelles locale, mésoscopique, macroscopique et éléments de structure, avec le challenge d'adapter aux différentes échelles les protocoles d'accélération de la pathologie et de choisir les « meilleurs » matériaux initialisant la RSI.

À partir des essais expérimentaux réalisés à l'échelle locale sur matériaux sains et atteints de RSI, les objectifs de cette thèse sont doubles : identifier les paramètres du modèle interfacial à l'échelle locale et prédire les comportements mécaniques aux échelles plus grandes grâce aux outils numériques de remonté d'échelles (méthodes d'homogénéisation). Ainsi, des essais mécaniques seront d'abord réalisés et post-traités pour caractériser les paramètres du modèle à l'échelle locale sur des éprouvettes atteintes de RSI, par analyse inverse et corrélation d'images numériques. Puis, un modèle micromécanique, basé sur la méthode de zones cohésives, sera implémenté dans le code de calcul Xper, afin de prédire le comportement mécanique des échantillons sains et dégradés aux échelles supérieures. Enfin, des validations expérimentales sur matériaux modèles puis réels seront effectuées pour confirmer ou infirmer l'aptitude du modèle développé à restituer un comportement réaliste de la pathologie RSI.

SUJET DE LA THÈSE

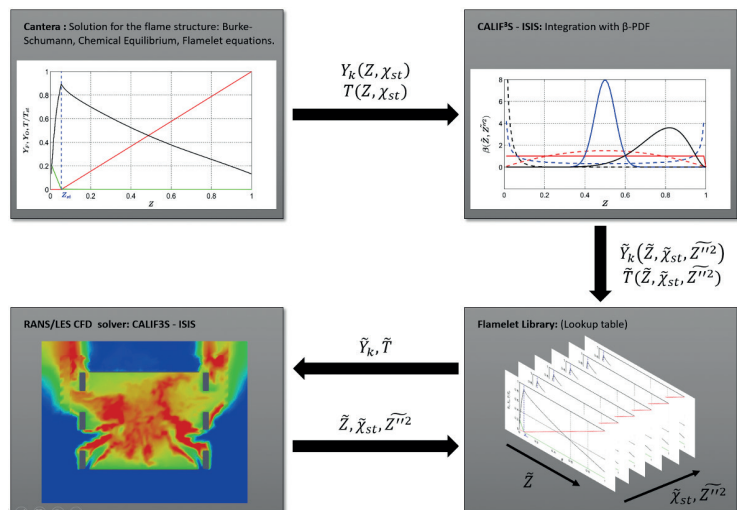
Modeling of combustion-turbulence interactions for the simulation of fires in confined and ventilated environments

Doctorant : Uday CHIKKABIKKODU  
 Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2020  
 École doctorale : Université de Poitiers et de Limoges/SIMME  
 Laboratoire d'accueil : PSN-RES / SA2I / LIE & Institut P'  
 Tuteur de thèse : Germain BOYER  
 Directeur de thèse : Arnaud MURA - Institute P'  
 Financement de thèse : IRSN

Turbulent diffusion flames occurring in fires are characterized by a chemical time scale generally assumed to be much shorter than the turbulent mixing time scale. Therefore, basic models such as the Eddy Dissipation Model (EDM) classically used in fire dynamics simulation tools, such as the IRSN CALIF3S-ISIS software, assumes that chemistry is infinitely fast compared to the flow, and that the burning rate is determined by the characteristic turbulent mixing time. However, these models suffer from several shortcomings:

- The infinitely fast chemistry assumption and the absence of chemistry modelling does not allow predicting intermediate combustion by-products, in particular those involved in the soot production, which plays a very important role in the dissipation of the energy by radiation within the flame.
- These type of models assume that the burning rate is same if the turbulent mixing is the same. Therefore, some events such as extinction, re-ignition, quenching and flame stretching that may occur in confined-ventilated compartment configuration such as glove box are not predicted.

In this context, the objective of this thesis is to gradually develop a flamelet turbulent combustion model with presumed probability density function so as to simulate varied fire conditions in non-pre-mixed or partially premixed combustion. As a first step, usual flamelet models (infinitely fast reversible chemistry, irreversible chemistry with finite rate) will be used together with a  $\beta$ -PDF distribution to provide the turbulent flame structure as a function of the average turbulent mixture fraction and its variance. In this purpose, efficient utilities related to the integration of the  $\beta$ -distribution and to the use of laminar flamelet structures look-up tables will be implemented. The resulting model is expected to provide a better description of the flame temperature and the knowledge of important combustion intermediate products concentration. Such a model will be validated in particular on existing databases such as the TNF flames. In the latter stages of the thesis, this approach will be enhanced by accounting for more physical effects. For instance, partial extinction can be accounted for by including the effects of radiative losses and the scalar dissipation rate on the flamelet chemistry. In a similar way, reignition can be modelled in terms of partial premixing effects, by introducing a joint PDF depending on the mixture fraction and a progress variable indicating the presence of burnt gas or fresh gas.



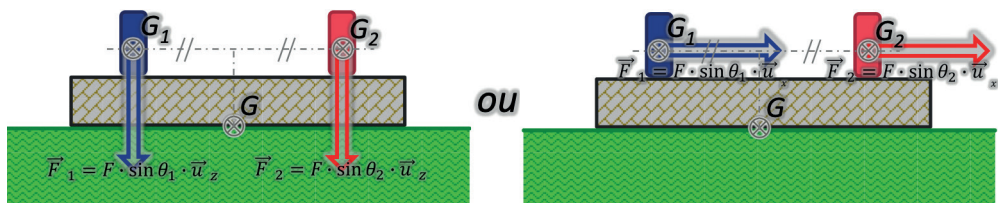
## SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation *in-situ* de l'interaction sol-structure (ISS) au travers de la mesure de la fonction d'impédance (FI)

Doctorant :	Julien CLEMENT
Date du début de la thèse :	05/10/2020
École doctorale :	École Doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris
Laboratoire d'accueil :	PSN-EXP/SES/LMAPS
Tuteur de thèse :	Maria LANCIERI
Directeur de thèse :	Jean-François SEMBLAT - ENSTA
Co-directeur :	Benjamin RICHARD - IRSN
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre des évaluations de sûreté, les exploitants nucléaires sont amenés à fournir des dossiers de justification de la résistance de leurs ouvrages au séisme. Pour cela ils s'appuient sur des méthodes de calcul présentant peu de marges (calcul dit « best estimate ») ou dont les hypothèses simplificatrices sont discutables par rapport à la réalité de l'installation. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas de la simulation de l'interaction sol-structure, phénomène correspondant à la modification du mouvement du sol en présence d'une structure par rapport au mouvement qu'il aurait eu en l'absence de cette dernière. L'évaluation en est, à ce jour, uniquement réalisée par simulations numériques sans possibilité de se référer à des caractérisations *in situ* pour un bâtiment à l'échelle un. 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. La mise en œuvre de cette méthode est simple et pratique étant donné qu'elle permet de décrire la relation effort-déplacement à l'interface sol-fondation pour des sollicitations harmoniques dont on fait varier la fréquence. Toutefois, cette méthode s'appuie sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, au sujet de la stratigraphie du sol par exemple. A cet égard, il serait pertinent de disposer de données provenant d'un essai *in-situ* pour vérifier sur un cas simple (fondation circulaire superficielle) si ces méthodes de calcul, fondées sur les hypothèses courantes, donnent des résultats cohérent avec la mesure.

Les travaux de recherche qui seront réalisés dans le cadre de cette thèse ont pour but de mettre au point un dispositif à vocation industriel permettant de mesurer, *in situ*, la FI d'ouvrages dont le système de fondation est superficiel (par exemple radier épais). La difficulté principale d'une telle tâche relève de l'impossibilité de mesurer l'évolution des efforts à l'interface sol-fondation. Néanmoins, cette difficulté peut être contournée en pilotant le système sol-fondation en effort et en mesurant les déplacements du sol à l'aide de capteurs sismiques (vélocimètres et/ou d'accéléromètres) pour estimer la FI. Dans le cas du dispositif que j'ai conçu, les efforts sont générés par des pots vibrants qui appliquent un effort unidirectionnel sinusoïdal dont on peut piloter la fréquence. La figure 1 propose une illustration d'un tel dispositif.



*Schéma principe du dispositif envisagé : des pots vibrants générant des efforts d'inerties sinusoïdaux uni-axiaux sont ancrés à la fondation. En fonction de l'orientation et du déphasage, l'effort résultant est un moment ou une force. La mesure du déplacement, la connaissance des efforts et la détermination de l'équation analytique du mouvement permettent d'en déduire l'effort à l'interface sol-fondation en fonction du temps pour la fréquence de sollicitation des pots vibrants.*

Afin de mettre à l'épreuve le dispositif envisagé et d'en évaluer l'applicabilité d'un point de vue industriel, un essai *in-situ* est prévu au titre de cette thèse. Le site envisagé, est le site Européen EURO-SEISTEST au voisinage de Thessalonique en Grèce. L'intérêt particulier de ce dernier est de disposer d'une maquette de fondation superficielle rigide déjà construite et largement instrumentée ainsi qu'un contexte géotechnique bien caractérisé. Ce dernier point permettra de renseigner des modèles de calculs afin de confronter des résultats issus des différentes méthodes usuellement mise en œuvre dans l'industrie aux mesures de la FI réalisées dans le cadre de la campagne expérimentale prévue au titre de cette thèse.

## 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
École doctorale :	Université de Lille / Science de la matière, du rayonnement, et de l'environnement
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SAM / LETR
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN
Directeur de thèse :	Olivier TOUGAIT - Université Lille
Financement de thèse :	IRSN

In order to predict the behavior of fuel and core in severe accident situations, some research topics have been identified related with the current development of so-called Accident Tolerant Fuels (ATF), of which the aim for industry is to enhance safety, competitiveness and economics of nuclear power. The characteristics targeted for such fuels are improvement of corrosion resistance in steam for the cladding, of the retention of fission products for fuel and minimization of the interaction between them. Among the near-term concepts proposed, the use of chromium oxide as a dopant in uranium dioxide ( $UO_2$ ) and the chromium-coated zirconium alloys are the most important ones.

The thesis including both experimental and simulation investigations, will focus on experimental determination of phase equilibria at high temperature, in particular involving liquid phase in the Zr-O-Cr and U-O-Cr systems, in case to realize thermodynamic optimization by CALPHAD of these systems with these experimental data, and to derive criteria for ATF rod failures to be implemented in the ASTEC code according to this model.

To start, the work will focus on Zr-Cr-O system and its subsystems which are not certainly determined. For the Zr-Cr binary phase diagram, experiments will aim on confirming eutectic temperatures and compositions, as well as the liquidus temperatures in the zirconium-rich zone. These data will be complemented by determining the thermodynamic properties of the  $ZrCr_2$  compound, which presents complex solid transformations, leading to metastable states up to elevated temperature. For the Zr-Cr-O system, the solubility of Cr-species in zirconia will firstly be determined for various ranges of  $pO_2$  and temperature, from reducing to oxidizing atmospheres and from low to elevated temperatures. Then the solubility of oxygen in liquid Zr-Cr alloys will be also found out. These data will be enriched by determining the thermodynamic properties of the ternary compound  $Zr_3Cr_3O$ .

These investigations will adopt X-ray and electronic diffractions for the determination of crystalline structures, scanning electron microscopy for the characterization of the microstructure, electron probe micro-analysis for the identification of phases, differential thermal analysis for the determination of invariant transformation temperatures and liquidus curves, measurements of direct reaction or dissolution and differential scanning calorimetry for the production of thermodynamic quantities (such as enthalpies of formation) for  $ZrCr_2$  and  $Zr_3Cr_3O$  compounds. These investigations will be complemented by ab initio calculations with the VASP code.

From these data, the Gibbs energy parameters for each phase in the Zr-Cr-O system will be determined within a CALPHAD modelling which is looking forward to benefit the improvement of IRSN's NUCLEA thermodynamic database.

## SUJET DE LA THÈSE

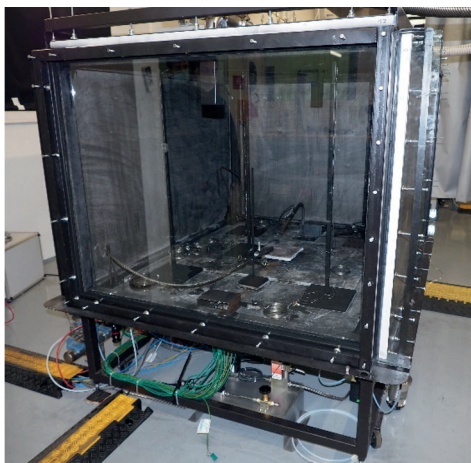
**Étude des régimes de combustion dans un environnement  
sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées  
en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé**

Doctorant :	Emeline GEORGES
Date du début de la thèse :	19/10/2020
École doctorale :	Aix-Marseille Université/ Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SA21/LEF
Tuteur de thèse :	Hugues PRETREL
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN – IUSTI
Co-directeur :	Hugues PRETREL – IRSN
Financement de thèse :	IRSN

Une des missions de l'IRSN est l'évaluation du risque incendie en s'appuyant notamment sur l'utilisation de logiciels de simulation. Dans les installations nucléaires, les scénarios d'incendie concernent des foyers (câbles électriques ou boîtes à gants) en milieux clos et mécaniquement ventilés. Un des phénomènes physiques partiellement maîtrisés est l'influence du milieu environnant sur le processus de combustion. La viciation de l'air contribue à réduire la puissance du foyer, alors que l'élévation de température des gaz favorise son augmentation. À ce jour, bien que l'influence de la diminution de l'oxygène sur la puissance de l'incendie soit prédite de façon satisfaisante, l'influence couplée et antagoniste avec l'augmentation de la température est mal connue. L'objectif de la thèse est l'étude de cette influence couplée sur le processus de combustion.

Ce travail sera mené sur le scénario particulier des foyers en hauteur dans un local confiné, scénarios régulièrement rencontrés dans les installations nucléaires. Deux axes de travail sont identifiés :

- un premier axe porte sur la caractérisation du scénario du foyer en hauteur en se concentrant sur l'influence de l'élévation du foyer sur les mécanismes de remplissage de l'enceinte par les fumées (stratification thermique et champs de concentration d'oxygène) et sur la combustion du foyer (taux de pyrolyse et régimes de combustion) ;
- un deuxième axe de travail concerne l'étude de la relation entre le débit de pyrolyse et les caractéristiques du milieu environnant (teneur en oxygène et température) pour, à terme, proposer des modèles physiques pouvant être introduits dans les outils de simulation.



Dispositif à échelle réduite NYX

Trois moyens d'études seront utilisés. Le premier est le dispositif à échelle réduite NYX (sur la photo ci-jointe) destiné à l'étude de l'influence de la hauteur du foyer, ainsi que celle de la concentration en oxygène et de la température sur le taux de combustion. Une seconde approche consistera à réaliser des simulations numériques (avec le code de calcul CFD ISIS) afin d'étudier l'influence de la hauteur du foyer sur les champs de température et d'oxygène. Enfin, des approches théoriques simplifiées seront également menées pour expliciter les grandeurs adimensionnelles impliquées dans la compréhension des foyers en hauteur.

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude de la propagation et du contrôle des fumées 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
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SA2I / LIE
Tuteur de thèse :	Samuel VAUX
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN - IUSTI
Financement de thèse :	IRSN

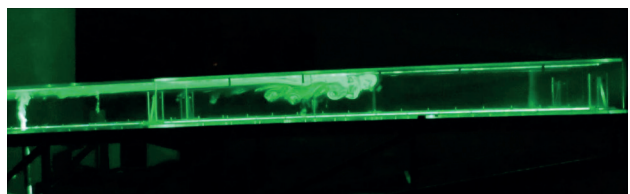
Dans le cadre de stockages de déchets radioactifs en couches géologiques profondes, l'étude des feux en milieu souterrain est un des enjeux de sûreté majeurs. En effet, il faut veiller à minimiser le risque d'altérer le confinement des matières radioactives (perte d'intégrité des structures abritant les conteneurs de déchets et dégradation de l'étanchéité de ces conteneurs sous l'effet de l'incendie), mais également veiller à assurer la sécurité des personnes travaillant dans ces installations.

Pour ces raisons, la maîtrise du risque incendie est primordiale. Afin d'appréhender au mieux ce risque, il est nécessaire d'estimer différents paramètres tels que le terme source et de déterminer les écoulements fluides en jeu afin de proposer *in fine* le type de stratégie à mettre en place. Cette thèse intègre les différentes étapes (allant des causes aux solutions) en se concentrant plus spécifiquement sur la maîtrise aéraulique du système.

L'objectif de la thèse est la compréhension des effets induits par la ventilation mécanique sur la propagation des fumées dans un système de galeries souterraines. Cette thèse a donc pour but d'accéder à une cartographie et à la compréhension des régimes d'écoulements en fonction de paramètres tels que la pente ou encore la puissance du foyer pour un scénario de ventilation choisi. Les résultats permettront d'apporter des éléments objectifs et quantifiés de réponse sur la nécessité de ventiler de façon spécifique les galeries.

La première étape de la thèse consiste à se familiariser avec la bibliographie afin d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes physiques de ce type de problème (effet du confinement,...). Parallèlement à cette étude bibliographique, la thèse intègre une composante expérimentale grâce à l'utilisation d'une maquette modulable de tunnel inclinable « air-hélium ». Sur cette maquette, il est notamment possible de contrôler le fluide injecté dans le tunnel, la pente ( $\pm 20\%$ ), la ventilation et de quantifier les écoulements fluides en utilisant une métrologie adaptée (tomographie, PIV). La suite de la thèse va se consacrer à la réalisation de différents essais (sur la pente, la ventilation mécanique, etc.) et à leur analyse.

Parallèlement à cette étude expérimentale, des simulations CFD seront réalisées, avec le logiciel ISIS, afin de le valider sur les données expérimentales obtenues dans ce type d'écoulements.



Écoulement Air/Hélium (représentatif de la fumée) dans la maquette du tunnel

## SUJET DE LA THÈSE

Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grains dans l' $\text{UO}_2$ 

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

La thèse s'inscrit dans la « question 5 » de la stratégie scientifique de l'IRSN : « Comment mieux caractériser et modéliser les phénomènes qui génèrent des contraintes thermomécaniques et chimiques sur la première barrière ou font évoluer ses modes de dégradation ou de ruine ? ». Comme décrit dans la démarche de recherche cœur combustible, le relâchement des gaz de fission joue un rôle dans le chargement d'un accident de réactivité. En effet, des gaz de fission peuvent s'accumuler aux joints de grains dans le combustible nucléaire et entraîner leur rupture. Afin de modéliser le comportement mécanique global du combustible, il est nécessaire de connaître précisément le seuil de rupture des joints de grains. Les valeurs seuil utilisées actuellement dans les codes de modélisation thermomécanique du combustible sont soumises à caution.

Cette thèse porte sur l'étude du dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ), utilisé dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée, dans le but d'obtenir des paramètres mécaniques de rupture au niveau des joints de grains. Dans un premier temps, à l'échelle atomique, des calculs de dynamique moléculaire avec un potentiel semi-empirique à charges variables (SMTB-Q) tenant compte de l'environnement des atomes seront effectués. Ces calculs permettront l'obtention de contraintes à rupture locales des joints de grains du combustible. Ils seront réalisés à l'aide du logiciel LAMMPS (*Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator*). Cependant, dans la littérature, les valeurs obtenues en dynamique moléculaire pour différents matériaux sont plusieurs ordres de grandeurs plus élevées que les contraintes issues des calculs à des échelles supérieures (micromécanique). Dans un second temps, des techniques de raccordement d'échelle, basées sur des considérations thermodynamiques, seront donc mises en œuvre afin de remonter jusqu'à l'échelle mésoscopique. Enfin, toujours à l'échelle mésoscopique, des calculs mécaniques de rupture à l'aide d'une approche micromécanique développée par l'IRSN seront effectués. Cette approche repose sur une approche cohésive-volumétrique à l'aide des notions de zone cohésive frottante (MZCF) et de méthodes de modélisation numérique des systèmes multicorps basées sur l'approche Non Smooth Contact Dynamics (NSCD). Le code de calcul associé, Xper permet d'analyser les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures au sein des matériaux hétérogènes. L'ensemble des calculs permettra d'évaluer des critères de rupture utilisables dans des calculs macroscopiques.

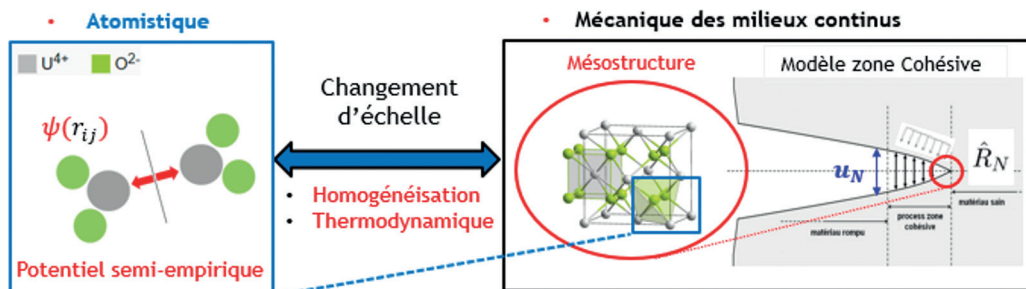


Illustration de la démarche pour obtenir le critère de rupture des joints de grains

## SUJET DE LA THÈSE

**Étude expérimentale de la faisabilité  
de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants**

Doctorant :	Julie NGUYEN-SADASSIVAME
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
École doctorale :	Centrale Lille / Science de la Matière, du Rayonnements et de l'Environnement
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Christophe VOLKRINGER - UCCS
Co-directeur :	Thierry LOISEAU - UCCS
Financement de thèse :	IRSN / NUVIA

Le Xénon et le Krypton sont des gaz rares 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 Kr-85 et 5,3 jours pour le Xe-133). 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, 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 Framework) ont démontré des capacités de piégeage efficaces vis-à-vis de composés volatils comme par exemple la capture du CO<sub>2</sub>. En effet, ces matériaux hybrides métal-ligand, organisés en réseau, sont modulables à souhait avec des diamètres de pores très variables. Ils possèdent également une fonctionnalisation illimitée liée à la partie organique qui peut favoriser une adsorption sélective des gaz.

L'objectif de la thèse est alors d'étudier la faisabilité de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants tels que les MOFs. Cela contribuera à terme à mieux caractériser le transfert de la contamination dans une installation et vers l'environnement, ainsi que l'efficacité des dispositifs de filtration ou d'épuration dédiés à réduire les rejets en fonctionnement normal et accidentel (question S1 de la démarche de recherche de l'Institut).

Ce travail de thèse consiste en une étude expérimentale sur le piégeage du krypton et du xénon par des MOFs. Ces derniers sont synthétisés à l'UCCS de Lille avec différentes fonctionnalisations, notamment l'insertion de métaux nobles. L'efficacité de piégeage des MOFs synthétisés est ensuite évaluée sur un banc expérimental (SAFARI) déjà existant à l'IRSN, permettant de travailler en température sous différentes atmosphères. En mesurant le krypton ou le xénon, en amont et en aval du matériau par chromatographie gazeuse couplé à un spectromètre de masse (GC-MS), le facteur de décontamination propre au matériau poreux étudié sera déterminé. De plus, la caractérisation du MOF sera réalisée avant et après la mise en contact du contaminant (structure DRX, surface spécifique BET, capacités d'adsorption des gaz...). La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) du solide après adsorption sera notamment mise en œuvre dans le cas du xénon, afin de le localiser et d'identifier ses interactions avec la charpente poreuse.



## 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**

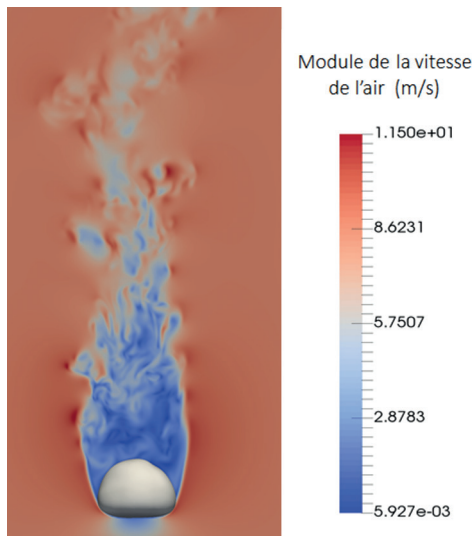
Doctorant :	Emmanuel REYES
Date du début de la thèse :	10 / 12 / 2020
École doctorale :	Normandie Université / PSIME
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES/SCA/LPMA & UMR 6614 - CORIA
Tuteur de thèse :	Pascal LEMAITRE
Directeur de thèse :	Alain BERLEMONT – CNRS/CORIA
Co-directeur :	Thibaut MENARD – Université de Rouen
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 collectée 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. Ma méthodologie repose sur des suivis lagrangien des particules dans des écoulements simulés en DNS. Les trajectoires des particules sont déterminées en appliquant itérativement le principe fondamental de la dynamique en considérant toutes les « forces » pouvant mener à la collision de la particule sur la goutte : inertie, gravité, traînée hydrodynamique, forces électriques et phorétiques et enfin mouvement brownien.

Un verrou scientifique majeur persiste, pour déployer cette approche car à partir d'un diamètre de 1,2 mm les gouttes à leur vitesse limite de chute oscillent à grande fréquence, ce qui rend les équations de Navier-Stokes particulièrement délicates à simuler. Néanmoins, des approches hybrides couplant les méthodes *Level-Set*, *Gost-Fluid* et *Volume of fluid* ont été développée à l'université de Rouen. Ce couplage



Écoulement autour d'une goutte de 5 mm

permet de suivre dynamiquement des interfaces libres et sont donc adaptées pour simuler des oscillations. La figure présente un exemple d'écoulement simulé par cette méthode autour d'une goutte de 5 mm de diamètre, à sa vitesse terminale.

De plus, pour modéliser les effets phorétiques, il est indispensable de coupler cette approche à un modèle d'évaporation, qui permette de simuler les flux de Stefan mais aussi les champs de températures et de fraction de vapeur afin d'appliquer rigoureusement les forces de diffusiophorèse et de thermophorèse sur les particules.

Cette approche théorique sera validée dans un premier temps sur la base des caractéristiques des écoulements simulés (vitesses limites, coefficients de traînée, régimes d'oscillation, vitesses de Stefan, etc.).

Puis, dans un second temps, les efficacités de collecte déterminées par les suivis lagrangiens seront confrontées aux mesures issues de la littérature.

## SUJET DE LA THÈSE

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

---

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

---

Dans une centrale nucléaire de type réacteur à eau sous pression, l'échange thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait au travers d'un grand nombre de tubes en U rassemblés dans des Générateurs de Vapeur (GV). En cas de rupture de tube(s) de GV (RTGV), l'eau du circuit primaire, qui contient des éléments radioactifs, se verse dans le circuit secondaire (perte de la deuxième barrière de confinement). Dans le cadre de la tenue mécanique des tubes des (GV), le phénomène étudié est notamment l'instabilité fluide-élastique. Concernant le parc nucléaire français, trois RTGV survenues entre 2004 et 2008 sur les tranches de Cruas 1 et Cruas 4 ont été attribuées au développement d'une instabilité fluide-élastique.

Dans le cadre du programme de travail démarré au PSN-RES/SEMIA sur l'interaction fluide-structure au sein des GV, l'IRSN en collaboration avec IMFT et EDF lab Chatou débute ce travail de thèse, dont les objectifs sont :

- La caractérisation des structures/régimes d'écoulement diphasique au sein d'un faisceau tubulaire de GV (l'évolution de ces structures traversant le faisceau tubulaire d'un GV n'est pas suffisamment connu) ;
- La caractérisation de la réponse vibratoire de tubes sous ces différentes structures/régimes d'écoulement diphasique ;
- L'évaluation de la capacité des outils de simulation numériques CFD de prédire les écoulements et le comportement vibratoire dans la configuration d'intérêt.

Pour atteindre ces objectifs, on se propose de réaliser des campagnes de caractérisation expérimentale. Ces campagnes expérimentales seront suivies par simulations numériques, à l'aide du code CFD Neptune, au sein duquel EDF a développé une approche permettant la prise en compte des phénomènes d'interaction fluide-structure.

On peut décomposer le travail de thèse en deux phases :

- Pendant la première année de thèse, on se propose de concevoir et réaliser un dispositif expérimental permettant de produire un écoulement diphasique eau-air transverse à un faisceau tubulaire. Ce faisceau tubulaire sera composé d'un nombre de tubes très limité, par rapport à la configuration réelle d'un GV. Pendant la deuxième année, une campagne expérimentale dédiée à caractériser l'écoulement diphasique impactant sur les tubes sera réalisée. Les résultats de cette campagne seront ensuite confrontés aux simulations numériques.
- Une deuxième campagne expérimentale sera dédiée à l'investigation du comportement vibratoire du faisceau tubulaire, l'aspect vibratoire du faisceau tubulaire sera étudié à l'aide d'un tube mobile instrumenté. Pendant la troisième année les résultats de cette campagne seront ensuite confrontés aux simulations numériques.

## 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
École doctorale :	Université de Montpellier / Information Structures Systèmes
Laboratoire d'accueil :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Yann MONERIE - LMGC
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre du questionnement scientifique formulé dans la question 5, sous-question 5.1, du domaine de la sûreté-sécurité de la stratégie scientifique de l'IRSN : « Comment mieux caractériser et modéliser les phénomènes qui génèrent des contraintes thermomécaniques et chimiques sur la première barrière ou font évoluer ses modes de dégradation ou de ruine ? ». Selon le document de démarche de recherche relative au combustible, au cœur et à la chaudière en situation accidentelle, ce sujet s'intègre dans les activités de recherche sur le thème du comportement des crayons de combustible. Il vise à améliorer les modèles thermomécaniques actuels au moyen d'approches multi-échelles. Ces travaux sont menés notamment dans le cadre du MIST - laboratoire commun entre l'IRSN, le CNRS et l'Université de Montpellier. C'est dans ce cadre qu'est développé le logiciel XPER, dédié à la fissuration dynamique des matériaux hétérogènes. L'objectif 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). 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 géométriquement simple (1,5D).

Durant la première année, il est prévu de réaliser une étude bibliographique sur les propriétés mécaniques du combustible  $UO_2$ , sur le code SCANAIR, sur le RIA, sur les modèles de zones cohésives, sur le code XPER et sur les modèles d'endommagement micromécanique en viscoplasticité. Un des objectifs est d'établir un nouveau modèle de zones cohésives d'endommagement surfacique viscoplastique en suivant l'approche micromécanique de Nkoumbou Kaptchouang (thèse IRSN, 2019). Il est prévu que ce futur modèle prenne en compte l'effet de vitesse de sollicitation locale ainsi que la différence de comportement de l' $UO_2$  en traction et en compression. La deuxième année aura pour but d'implémenter ce nouveau modèle dans XPER et d'identifier les différents paramètres matériaux pour le combustible  $UO_2$  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 en RIA) et les résultats obtenus seront comparés avec des résultats expérimentaux du programme CABRI-REP-Na.

## 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

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

Pour certains ouvrages de génie civil nucléaire en béton armé tels que les bâtiments annexes, la caractérisation mécanique de leur comportement constitue un défi majeur afin d'évaluer de manière réaliste le transfert des spectres de plancher depuis le sol vers les équipements, en particulier lorsque des sollicitations sismiques au-delà du niveau de dimensionnement sont considérées.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme de travail visant à mieux maîtriser ce transfert de spectre dans le cas d'une structure en béton armé manifestant des non linéarités modérées. Pour cela, il est nécessaire d'identifier de manière pertinente les différentes sources de dissipation d'énergie : dissipation visqueuse, dissipation numérique liée au schéma d'intégration temporelle mais surtout les dissipations matérielles dont l'interaction entre le béton et les armatures en acier. La prise en compte de cette interface acier-béton a une importance significative sur le processus de fissuration des structures en béton armé et la répartition des fissures. En ce qui concerne la prise en compte du comportement mécanique de cette interface dans la modélisation numérique, elle demeure insatisfaisante puisque d'une part elle ne permet pas de prédire de manière fine la fissuration (Phan 2012) (espacement et ouverture) et d'autre part, une mise en œuvre à l'échelle d'un bâtiment industriel reste fastidieuse.

L'objectif principal de ce travail de thèse est donc d'améliorer la manière dont est prise en compte la dissipation d'énergie au niveau de l'interface acier-béton dans les modèles de bâtiments formulés dans le cadre de la méthode aux éléments finis de type multi-couches. Les relations entre les nœuds d'acier et de béton seront traduites par des relations cinématiques pouvant se dégrader avec l'augmentation du niveau de chargement. Une étape de validation du modèle sur la base d'essais simples standardisés est nécessaire. Une application du modèle sera ensuite réalisée à l'échelle d'une structure de type plancher-voile.

Dans un premier temps, une étude unidirectionnelle de l'évolution de la relation cinématique entre les éléments en béton et acier est en cours de réalisation. L'avantage de cette méthodologie, basée sur des techniques de réduction de modèle est qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter des degrés de liberté supplémentaires pour modéliser l'interface. Une intégration naturelle de cette méthode est par ailleurs possible dans une stratégie de résolution par éléments finis classique. Des essais expérimentaux présents dans la littérature, complétés de simulations numériques permettront ensuite de créer une base de données visant une identification de l'interface par des techniques de réseaux de neurones afin de construire la loi de comportement à l'interface et l'évolution de la relation cinématique à imposer.

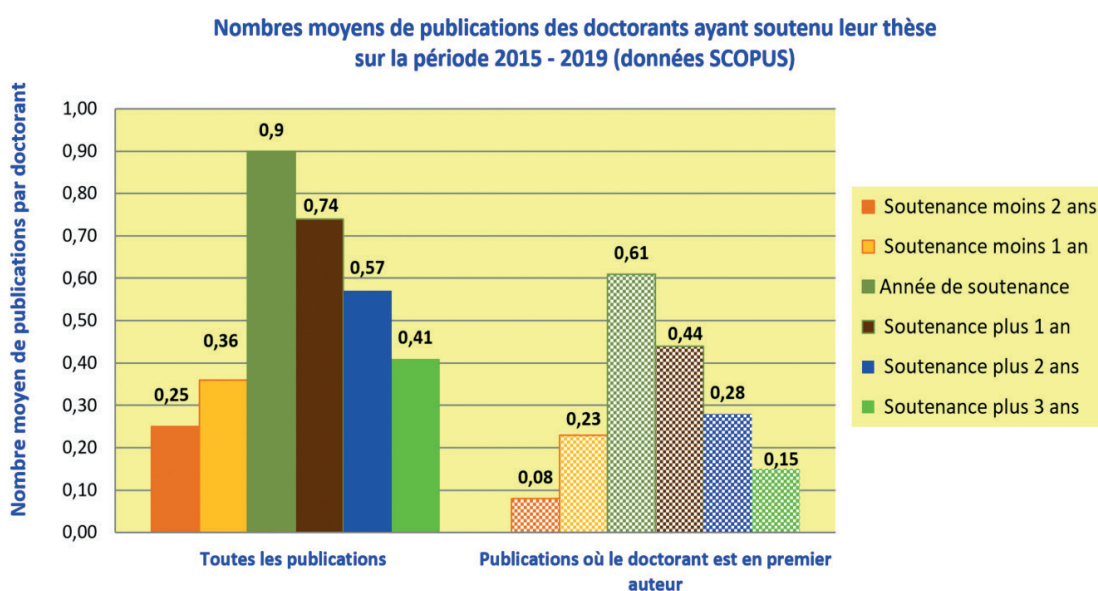
# Du chercheur à l'inventeur



## LES PUBLICATIONS DES DOCTORANTS DE L'IRSN IRÈNE SOROKINE-DURM (DST / SP<sup>3</sup>IN)

En tant qu'organisme de recherche, l'IRSN accueille annuellement des doctorants et des post-doctorants afin de leur transmettre les connaissances et les compétences acquises au sein de ses équipes. Les résultats de ces jeunes chercheurs sont publiés dans des revues scientifiques pendant, et/ou après, la réalisation de leurs travaux de recherche à l'Institut. Les publications attestent du savoir-faire des doctorants, diffusent les connaissances acquises lors de la formation doctorale et permettent de *s'inscrire dans un espace de visibilité scientifique*. Les chartes de thèse de la majorité des universités européennes ont d'ailleurs un paragraphe consacré aux publications et à la valorisation des travaux de doctorat, les jurys de thèse, quant à eux, accordent une attention toute particulière à la production scientifique, de préférence en tant que premier auteur des publications parues.

Le document IRSN *Formation à et par la recherche - bilan des années 2015 et 2016 (DSDP/2018-00084)*, ainsi que le document suivant en cours de rédaction (années 2017 à 2019), présentent la production scientifique des doctorants selon l'année de parution de leurs publications par rapport à leur soutenance de doctorat.



*Légende : Participation des doctorants ayant obtenu leur doctorat en 2015 – 2019 aux publications de l'IRSN parues pendant la période 2013 – février 2021 dans SCOPUS. Moyennes annuelles par rapport à l'année de soutenance du doctorat. La représentation en motif damier correspond aux moyennes lorsque le (la) doctorant(e) est en premier auteur(e), les couleurs pour les différentes années ont été conservées.*

Les 135 doctorants ayant soutenu leur thèse sur la période 2015 – 2019 sont co-auteurs de 384 publications parues sur la période 2013 – février-2021, publications indexées dans la base internationale SCOPUS. En très grande majorité (87%), ces publications sont des *articles* ou des *revues d'articles*, le type ACL en codification HCERES. Les travaux de thèse donnent lieu à des publications dès la deuxième année de thèse comme le montre la figure ci-dessus (cf. point « soutenance moins 2 ans »). L'année de soutenance du doctorat correspond au pic de production en publications.

Les résultats issus des travaux de thèse peuvent être publiés plusieurs mois, voire plusieurs années, après la soutenance de thèse, sans compter que les délais de parution varient selon les éditeurs et les domaines scientifiques. Une estimation réaliste de la production des doctorants formés à l'IRSN, pourrait inclure une période temporelle de 3 ans après la fin de thèse. La figure ci-dessus confirme cette observation (voir les barres en vert fluorescent).

Toutes proportions gardées, sur la période de publication 2013 – février-2021, 57% des publications sont cosignées en 1<sup>er</sup> auteur pour les *docteurs-génération-2015-à-2019*, avec des variations selon les années de soutenance et, bien évidemment, selon l'avancement des recherches. En fin de thèse, en moyenne, 68% des publications des 5 générations de docteurs (2015 à 2019) sont co-signées en 1<sup>er</sup> auteur.

Une enquête *CEREQ*<sup>1</sup> sur les docteurs génération-2010 affiche que 56% à 59% des docteurs ayant un profil académique<sup>2</sup>, ou provenant d'organismes publics de type autre que le CNRS<sup>3</sup>, ont publié au moins deux articles dans des revues à comité de lecture *avant* leur sortie de thèse. A l'IRSN, en excluant les publications parues après l'année d'obtention du doctorat, cette valeur varie de 29% à 61%, avec une moyenne à 41%. En incluant les années post-doctorat, près à 11% des 135 docteurs nouvellement diplômés en 2015 – 2019 n'ont pas de publications indexées dans SCOPUS, ce qui n'exclut pas qu'ils aient pu présenter leurs travaux à des congrès sans actes, participer à la rédaction de rapports ou autre document.

Le document IRSN *Publication scientifiques et techniques – Bilan des années 2015, 2016 et 2017 (DST/2020-00015)* illustre la production scientifique des doctorants de l'IRSN sur la période de publication 2015 – 2017. Un focus présente les données concernant les doctorants ayant soutenu leur thèse depuis 2012, c'est-à-dire les doctorants étant en cours de thèse en 2015 – 2017 ou ayant quitté l'Institut depuis 3 ans au maximum :

- ces doctorants cosignent en moyenne 23% à 29% de l'ensemble des ACL de l'IRSN parus au cours du triennal considéré dans des revues bien reconnues car indexées au *JCR*<sup>4</sup>;
- lorsque toutes les publications sont prises en compte, actes de congrès et revues non indexées au *JCR* y compris, les résultats sont presque identiques : de 20% à 28% selon les années et le pôle d'accueil considéré, avec des valeurs légèrement supérieures de co-signature de doctorants dans le domaine de la radioprotection de l'homme et de l'environnement (PSE, 26% à 28%) par rapport au domaine de la sûreté (PSN, 20% à 25%).
- les doctorants signent au moins la moitié des publications auxquelles ils participent en 1<sup>er</sup> auteur. *En compte de présence*<sup>5</sup>, ces valeurs s'échelonnent de 49%, valeur observée pour PSE en 2015, à 74%, valeur observée pour PSN en 2015, avec une légère prédominance de signature en 1<sup>er</sup> auteur pour les doctorants/ex-doctorants de PSN. Cette légère prédominance de co-signature en 1<sup>er</sup> auteur pour PSN est due, en partie, au fait que les doctorants de PSN sont souvent seuls à cosigner les publications alors que les doctorants de PSE co-signent plus souvent à plusieurs une même publication et ne peuvent donc pas tous être en première position dans la liste des auteurs.

1. L'insertion à 3 ans des docteurs diplômés en 2010, Julien Calmand, Net.Doc.144, décembre 2015.

2. Doctorants ayant obtenu une allocation, enseignant durant leur thèse et travaillant généralement à l'université (hors labo CNRS) ou doctorants sans allocation, ayant d'autre type de financement et travaillant dans un laboratoire CNRS.

3. INRA, INSERM, etc.

4. Journal Citation Reports.

5. La publication compte comme une unité pour chaque co-auteur.



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 !

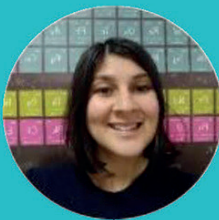
### Notre bureau



Sarah Braga Cohen  
Présidente



Ségolène Ladaigue  
Vice-Présidente



Coralie Carrier  
Trésorière



Marie Frerejacques  
Secrétaire

{ ASTHEC }

Association des  
THEsards de Cadarache




**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE




**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



CEA Cadarache  
13108 St Paul lez Durance Cedex

Retrouvez 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



# Besoin d'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE ?

## Ressources Documentaires, abonnements et veilles

 <p>Ressources documentaires et abonnements du SEARCH</p>	 <p>Consulter la liste des Ouvrages de la bibliothèque du SEARCH</p>	 <p>Commander un ouvrage</p>
 <p>Veilles du SEARCH</p>	 <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 Sidney Harris : Quoi ! c'est ça le big 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 SÛRÉTÉ NUCLEAIRE

# JEUNES CHERCHEURS

## Un accès facilité aux connaissances

### Découvrez ASK

# IRSN [ASK

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

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

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

DTR / D2MC2 / SEARCH

**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-irs.archives-ouvertes.fr/>

**IRSN** Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire

Publications de l'IRSN

Accueil Déposer Consulter Rechercher Services Mon espace Privés

Accueil

**Bienvenue sur le portail HAL de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN)**

Ce portail permet le **dépôt en ligne** et la **diffusion en libre accès** des publications de l'IRSN.

Le **7 mai 2019**, l'IRSN a mis en place un outil de gestion interne des publications, **ATHENA**, qui permettra un dépôt automatique des publications de l'Institut dans le portail HAL-IRSN.

L'IRSN participe ainsi à la dynamique de l'OPEN ACCESS et améliore l'**accessibilité** (sans frais), le **partage** (en respectant le délai de diffusion) et la **visibilité** (pour tous) de ses connaissances.

Le portail institutionnel HAL-IRSN est interopérable avec d'autres bases de données nationales et internationales d'OPEN ACCESS ou non (Google Scholar, Core, Base, Openline, PubMed, arXiv, RePEc...).

En tant que chercheur, vous pouvez utiliser le portail HAL pour ordonner des statistiques, des CV et des pages Web personnalisées. Alors n'hésitez pas, inscrivez-vous.

DOCUMENT AVEC TEXTE INTEGRAL
1 263
DOCUMENT SANS TEXTE INTEGRAL
3 485

**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@irs.fr](mailto:audrey.legendre@irs.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

## 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  pour consulter les dossiers d'archives de l'IRSN ou contactez les archivistes !

Vos contacts : [nathalie.doucin@irsn.fr](mailto:nathalie.doucin@irsn.fr) et [camille.bouchain@irsn.fr](mailto:camille.bouchain@irsn.fr)

DTR / D2MC2 / SEARCH

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

## INDEX DES PRÉSENTATIONS

Kossi Dovéné ABALO	PSE-SAN / SESANE / LEPID	12
Sirine AL DANDACHLI	PSN-RES / SEMIA / LSMA	135
Arnaud ALLERA	PSN-RES / SEMIA / LPTM	75
Coralie ALVAREZ	PSN-RES / SEREX / L2EC	108
Abdellah AMRI	PSE-ENV / SEDRE / UEMIS	71
Polina ARSENTEVA	PSE-SAN / SERAMED / LRMed	120
Mathilde BANJAN	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	65
Marion BAQUES	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	64
Yara BARAKAT	PSE-ENV / SEDRE / LETIS	40
Lydia BENSEMMANE	PSE-SAN / SERAMED / LRMed	90
Mohammed BENSIALI	PSE-SAN / SDOS / LEDI	14
Nathan BODEREAU	PSE-ENV / SRTE / LRTA	94
Marine BOUDIAS	PSE-ENV / SEDRE / LELI	101
Sarah BRAGA-COHEN	PSE-SAN / SERAMED / LRMed	36
Clément BROSSARD	PSE-SAN / SERAMED / LRMed	88
Aubin BRUNEL	PSN-RES / SA2I / LIE	29
Elsa CANTABELLA	PSE-ENV / SRTE / LECO	34
Clément CAR	PSE-ENV / SRTE / LECO	44
Coralie CARRIER	PSE-ENV / SAME / LERCA	99
Robert CAULK	PSE-ENV / SEDRE / LETIS	70
Uday CHIKKABIKKODU	PSN-RES / SA2I / LIE	136
Julien CLEMENT	PSN-EXP / SES / LMAPS	137
Delphine COSTA	PSN-RES / SCA / LEMAC	59
Jinjiang CUI	PSN-RES / SAM / LETR	138
Louise DARRICAU	PSE-ENV / SEDRE / LELI	111
Nicolas DECHY	PSN-EXP / SHOT / BFOH	82
Hugues DELATTRE	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG	83
Adrien DELAVAL	PSE-ENV / SRTE / LRTA	78
Antonin DESCHEMPS	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc	121
Charlotte DEWITTE	PSE-ENV / SEDRE / LETIS	41
Ethel-borel DJEUMEN-NKWECHEN	PSN-RES / SEREX / LE2M	104
Elizabeth DUFOURCQ-SEKATCHEFF	PSE-ENV / SRTE / LECO	25
Jad EL-ALAM	PSE-ENV / SEDRE / LETIS	110
Youness EL-OUARTASSY	PSE-SAN / SESUC / BMCA	122

... / ...



Louis ERMENEUX	PSE-SAN/SDOS/LDRI	123
Mohamed Yassir ERRAHMANI	PSE-SAN/SESANE/LEPID	124
Mohamad FARHAT	PSN-RES/SEREX/L2EC	53
Gauthier FONTAINE	PSN-EXP/SHOT/LSHS	47
Anaïs FOUCAULT	PSE-SAN/SESANE/LEPID	13
Marie FREREJACQUES	PSE-SAN/SESANE/LRSI	125
Kévin FRÖHLICHER	PSN-RES/SNC/LN	69
Bassam GAMAL	PSN-RES/SA2I/LIE	28
Juliana GARCIA SARMIENTO	PSN-RES/SAM/LEPC	18
Raphaël GAVART	PDS-DEND/SESN/BMAX	134
Mallia GEIGER	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	89
Tingting GENG	PSE-ENV/SEDRE/LELI	112
Emeline GEORGES	PSN-RES/SA2I/LEF	139
Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU	PSN-RES/SCA/LECEV	74
Loïc GISSELBRECHT	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	113
Manon GUILLOU	PSE-SAN/SERAMED/LRAcc	126
Noémie GUIRANDY	PSE-ENV/SRTE/LECO	26
Sandra GYASI	PSN-RES/SAM/LETR	21
Safir HADDAD	PSN-RES/SA2I/LIE	140
Daniel HARDY	PSN-RES/SCA/LPMA	57
Jérémie JANIN	PSN-RES/SA2I/LIE	31
Martin JESTIN	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	127
Ségoène LADAIGUE	PSE-SAN/SERAMED/LRMed	37
Kévin LALANNE	PSE-SAN/SDOS/LMDN	15
Géraldine LANDON	PSE-SAN/SESANE/LRSI	91
Elouan LE FESSANT	PSN-RES/SEREX/L2EC	22
Marie LECOQ	PSN-RES/SCA/LECEV	52
Pierre LEFEBVRE	PSE-ENV/SEDRE/LELI	95
Hantao LIN	PSN-RES/SCA/LECEV	50
Julie LOPES	PSE-SAN/SESANE/LEPID	128
Juan Estaban LUNA	PSN-RES/SEMIA/LEMC	107
Léo MACE	PSE-SAN/SESANE/LRTOX	35
Anaëlle MAGRE	PSE-ENV/SAME/LMRE	96
Paul MALFRAIT	PSE-ENV/SAME/LMRE	114

... / ...

Zafilaza Armi MANOROSOA	PSN-RES/SEMIA/LSMA	141
Jimmy MARTIN	PSN-RES/SEMIA/LIMAR	106
Zeinab MAWASSY	PSE-ENV/SRTE/LR2T	115
Modou MBAYE	PSN-RES/SCA/LPMA	58
Jean MULLER	PSN-RES/SEMIA/LIMAR	105
Julie NGUYEN-SADASSIVAME	PSN-RES/SEREX/L2EC	142
Fiiia-Charlotta NURMINEN	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	62
Dina OKHRIMCHUK	PSE-ENV/SRTE/LR2T	46
Mélody PALLU	PSE-SAN/SDOS/LDRI	98
Julie POUYA	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	42
Loïc QUEVAREC	PSE-ENV/SRTE/LECO	24
Emmanuel REYES	PSN-RES/SCA/LPMA	143
Goran RIAZI	PSE-SAN/SESANE/LRTOX	129
Zeinab RIDA	PSN-RES/SCA/LEMAC	56
Aya RIMA	PSN-EXP/SES/BEGC	76
Aurélien RIOT	PSN-RES/SAM/LETR	51
Laurie SAINT CRIQ	PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	84
Rihab SASSI	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	63
Magali SCHIANO DI LOMBO	PSE-ENV/SRTE/LECO	45
Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA	PSN-RES/SAM/BEAM	20
Thomas SEYER	PSE-ENV/SRTE/LRTA	116
Charlie SIRE	PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	117
Ahmad SLEIMAN	PSE-SAN/SDOS/LMDN	130
Déo-Gratias Kily SOURABIE	PSE-ENV/SRTE/LRC	118
Giuseppe SPINA	PSN-RES/SEMIA/LSMA	144
Ayedah TARIQ	PSE-ENV/SEDRE/LETIS	100
Yann THIBAUT	PSE-SAN/SDOS/LDRI	131
Clément TOSI	PSN-RES/SEMIA/LSMA	145
Maryam TRAD	PSN-EXP/SES/LMAPS	146
Romain VUIART	PSN-RES/SNC/LN	68
Alexandra WARTEL	PSN-EXP/SHOT/LSHS	16
Laura WARTSKI	PSN-RES/SAM/BEAM	19
Linkei WEI	PSN-RES/SAM/LEPC	30
Sarah ZAMANE	PSE-ENV/SRTE/LR2T	79

# 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

**LR2E:** Laboratoire de réalisation d'équipements Expérimentaux

**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 Aggressions 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

**LPTM:** Laboratoire de physique et de thermomécanique des matériaux

**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

**BEGC:** Bureau d'expertise du génie civil

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

**PSN-EXP/SHOT:** Service Homme Organisation Technologie

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

**BFOH:** Bureau d'expertise des Facteurs Organisationnels et Humains

... / ...

## **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 2021 : Céline Dinocourt, Brigitte Dubois [IRSN] et Véronique Laget, 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)

