



**HAL**  
open science

## Livret des thèses 2018

Gauzelin Barbier, Brigitte Dubois, Véronique Laget

► **To cite this version:**

Gauzelin Barbier, Brigitte Dubois, Véronique Laget. Livret des thèses 2018 : du 19 au 22 mars - Journée des thèses 2018 : Annecy. Journée des thèses, pp.1-142, 2018. irsn-04370581

**HAL Id: irsn-04370581**

**<https://irsn.hal.science/irsn-04370581>**

Submitted on 3 Jan 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

du 19 au 22 mars

# Journées des thèses 2018

Annecy



DIRECTION DE LA STRATÉGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DES PARTENARIATS

# Journées des thèses Annecy, 2018

➤ ➤ ➤ 19 - 22 mars

## Programme



**➤ Lundi 19 mars**

- 11 h 30 Ouverture du centre
- 12 h 30 Déjeuner

**➤ Lundi 19 mars - après-midi**

14 h 20 ➤ OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES ➤ Salle Spectacle

Jean-Christophe NIEL (Directeur général)

➤ PRÉSENTATION DE L'ADI(N)

➤ SESSION PLÉNIÈRE ➤ Salle Spectacle

***Le continuum environnemental***

**Marine ROULIER** - Cycle biogéochimique de l'iode dans les écosystèmes forestiers.

**Eric LASCAR** - Comportement du radium et de ses ascendants radioactifs dans les sols et transfert dans les végétaux terrestres.

**Alexandre FLOURET** - Modélisation de la disponibilité du césium-137 aux interfaces sol-solution- plante. Amélioration des outils expérimentaux déjà utilisés.

**Lucie STETTEN** - Spéciation et mobilité de l'uranium dans les sols et les sédiments lacustres situés en aval d'anciens sites miniers.

16 h 00 ➤ Pause

16 h 30 ➤ SESSION PLÉNIÈRE ➤ Salle Spectacle

**Thermodynamique**

**Adithya RAMANATHAN KRISHNAN** - Étude expérimentale et numérique par approche RANS et LES d'écoulements stratifiés turbulents.

**Romain HANOZET** - Effets de pentes sur la propagation et le contrôle de fumées dans les galeries souterraines : application à la maîtrise du risque incendie dans le projet de centre de stockage Cigéo.

**Maxime MENSE** - Étude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée.

**Roberto CARUSO** - Analyse de propagation de flamme hydrogène-air-vapeur en présence de gouttes d'eau.

**Mohamed BELERRAJOUL** - Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules.

19 h 10 ➤ Dîner

20 h 45 ➤ Soirée débat ➤ Salle Spectacle

« Question "Privé", quel devenir avec un doctorat IRSN ? »



**> Mardi 20 mars****08 h 30 > SESSION PLÉNIÈRE > Salle Spectacle****Dosimétrie**

**Manon JACQUEMIN** - Évaluation dosimétrique suite au radiomarquage de cellules *in vitro* avec des radionucléides émetteurs  $\beta^+$  pour le suivi de cellules *in vivo* par imagerie TEP : étude de la relation dose-effet et optimisation de protocoles.

**Tiffany BEAUMONT** - Impression 3D de fantômes anthropomorphes et démonstration de leur utilité en dosimétrie interne.

**Nicolas TKATCHENKO** - Développement de la spectroscopie de résonance paramagnétique électronique (RPE) des ongles pour la dosimétrie d'accidents radiologiques.

**09 h 50 > SESSION PARALLÈLE > Salle Tournette****Dépôt / mise en suspension**

**Benjamin BLAISOT** - Étude de la mobilisation d'aérosols par flashage de jet liquide : application à la problématique des poussières au cours d'une perte de vide par entrée d'eau dans ITER.

**Alexis DÉPÉE** - Approche microphysique du lessivage des aérosols radioactifs par les nuages : influence de la charge électrique des aérosols.

**Laura LINTIS** - Étude des mécanismes de sorption de l'eau sur des aérosols solides émis lors d'incendies : détermination des paramètres physico-chimiques d'influence.

**09 h 50 > SESSION PARALLÈLE > Salle Spectacle****Faibles doses**

**Caroline ARCANJO** - Évaluation des modes d'action toxique de l'eau tritiée sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*) : de l'ADN à l'individu.

**Alice BONTEMPS** - Étude de la réponse adaptative au niveau rénal après exposition chronique à de faibles concentrations d'uranium ou de fluor : identification des voies de signalisation impliquées lors d'expositions *in vivo* et *in vitro*.

**Ségolène BOUET RIVOAL** - Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses au sein de cohortes de travailleurs du cycle de l'uranium.

**11 h 00 > SESSION POSTER > Salles Charvin et Veyrier**  
(liste des sujets pages 89 et 105)

12 h 30 ▶ Déjeuner

## ▶ Mardi 20 mars - après-midi

14 h 10 ▶ SESSION PARALLÈLE ▶ Salle Tournette

### **Évaluation probabiliste des aléas externes**

**Amine BEN DAOUED** - Démarche probabiliste pour la modélisation de l'aléa inondation avec prise en compte des incertitudes.

**Thomas CHARTIER** - Modélisation de la sismicité sur les failles pour le calcul probabiliste de l'aléa sismique.

14 h 10 ▶ SESSION PARALLÈLE ▶ Salle Spectacle

### **Irradiation / pathologies**

**Amélie FRÉNEAU** - Étude comparative des effets moléculaires et cellulaires induits par des rayonnements X de différentes énergies.

**Mariam BEN KACEM** - Utilisation de mesures d'Efficacité Biologique Relative moléculaires et fonctionnelles pour prédire le risque après radiothérapie - Application aux fortes doses par fraction et aux forts débits de dose.

**Frédéric SOYSOUVANH** - Sénescence endothéliale radio-induite et conséquences sur les lésions radiques aux tissus sains.

15 h 15 ▶ SESSION PARALLÈLE ▶ Salle Tournette

### **Mécanique / endommagement**

**Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG** - Modélisation micro-mécanique de l'endommagement ductile par une approche cohésive volumique : application à l'UO<sub>2</sub> irradié.

**Paul EYMÉOUD** - Modélisation atomistique de la fragilisation des gainages combustibles nucléaires par les hydrures.

**Louis JOËSSEL** - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal poreux : application à un acier inoxydable austénitique irradié.

15 h 15 ▶ SESSION PARALLÈLE ▶ Salle Spectacle

### **Doses / effets**

**Julie COLNOT** - Risque de complications associées à la radiothérapie externe : étude comparative des doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie externe.

**Nicolas TANG** - Évaluation, à partir de modélisations nanodosimétriques, de l'influence de la compaction de la chromatine sur les effets radioinduits précoces et extension aux effets tardifs (dysfonctionnements et mort cellulaire).

16 h45 > SESSION PARALLÈLE > Salle Tournette

**Modélisation corium**

**Kasi Visweswara Siva Sai GAJAVALLI** - Description thermodynamique des phases dans le quaternaire Ag-In-Cd-Zr à haute température.

**Shambhavi NANDAN** - Modélisation d'évolutions de configurations du corium en fond de cuve en cas d'accident grave dans un réacteur nucléaire.

**Alejandro VILLARREAL LARRAURI** - Modélisation et analyse des processus de refroidissement sous eau des bains de corium en interaction avec le béton.

16h45 > SESSION PARALLÈLE > Salle Spectacle

**Transfert grande échelle**

**Thomas FERRACCI** - Modélisation de la charge en suspension des cours d'eau pour l'évaluation des flux de radionucléides.

**Pierre-Emmanuel OMS** - Transferts multi-échelles des apports continentaux sur le plateau du golfe de Gascogne.

**Ngoc Bao Tran LE** - Quantification d'incertitude par réduction de modèle de dispersion atmosphérique.

19 h00 > Dîner

20 h 30 > Conférence > Salle Spectacle  
« Il n'y a pas de programme génétique »

**> Mercredi 21 mars**

08 h40 > SESSION PLÉNIÈRE > Salle Spectacle

**Béton et matériaux cimentaires**

**Ekoé KANGNI-FOLI** - Apport de matériaux cimentaires modèles à la description des cinétiques de carbonatation de bétons bas-pH : conséquences sur la microstructure, le transfert de gaz et la déformation.

**Florian OUVRIER-BUFFET** - Développement et qualification de méthodes non-destructives ultrasonores pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton.

**Adrien SOCIÉ** - Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires.

**Ashish RAJYAGURU** - Capacité de prise en compte des perturbations chimiques par les codes couplés chimie-transport : une étude « expérience vs. simulation numérique » de l'impact des panaches salins.



## 10h45 &gt; SESSION PLÉNIÈRE &gt; Salle Spectacle

**Irradiation / pathologie**

**Annaïg BERTHO** - Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique : modélisation pré-clinique et aspects radiopathologiques.

**Alexia LAPIÈRE** - Effet d'un traitement par des probiotiques (*Faecalibacterium prausnitzii*) sur les atteintes du côlon radio-induites. Potentialisation de l'effet thérapeutique par les cellules stromales mésenchymateuses.

**Alexandre RIBAUT** - Effet thérapeutique des exosomes dans le traitement des lésions radio-induites musculo-cutanées.

## 12h10 &gt; Déjeuner

## &gt; Mercredi 21 mars - après-midi

13h30 > SESSION POSTER > Salles Charvin et Veyrier  
(liste des sujets pages 89 et 105)

## 14h55 &gt; SESSION PLÉNIÈRE &gt; Salle Spectacle

**Combustible / milieux poreux**

**Zhenhai ZOU** - Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé.

**Mathilde GESTIN** - Étude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température des gaines de crayons de combustible des centrales nucléaires en alliage de Zircaloy-4.

**Juan David PENA CARRILLO** - Étude expérimentale du transfert paroi / fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur / gouttes dans une géométrie tubulaire.

**Jianwei SHI** - Influence de la porosité sur les transferts thermiques au sein des chemins de câbles.

## 16h25 &gt; SESSION PARALLÈLE &gt; Salle Tournette

**Epigénétique**

**Rémi GUÉDON** - Contribution des processus épigénétiques dans la sensibilité et l'héritabilité de la réponse du nématode *Caenorhabditis elegans* à une exposition chronique aux rayonnements ionisants.

**Sophia MURAT EL HOUDIGUI** - Effet de l'exposition chronique aux rayonnements ionisants sur les mécanismes épigénétiques et leurs conséquences sur le développement du système nerveux central.

16h25 ▶ SESSION PARALLÈLE ▶ Salle Spectacle

**Neutronique**

**Léa TILLARD** - Étude de l'impact des options de gestions du plutonium et des actinides mineurs.

**Vaibhav JAISWAL** - Étude expérimentale des sections efficaces de diffusion de l'eau légère en spectre thermique, de leur dépendance en température et quantification des incertitudes associées.

19h30 ▶ Dîner

21h00 ▶ Soirée ADI(N) ▶ Salle Spectacle  
« Soyez rayés, Soirée rayée »

▶ **Jeudi 22 mars**

09h00 ▶ SESSION PLÉNIÈRE ▶ Salle Lys Martagon

**Sciences sociales**

**Mathias ROGER** - Analyse sociologique de la gouvernance des risques : le cas des Évaluations Complémentaires de Sûreté suite à l'accident de Fukushima.

**Manon BRITEL** - Analyse psychosociale de la radioprotection dans le domaine médical : perspectives pour l'IRSN.

**Ismail Maël GOUMRI** - Analyse socio-historique de choix controversés en matière de disposition de sûreté sur les INB Françaises : le cas des accidents graves.

**Oussama RABOUN** - Analyse et synthèse de l'information en support à la décision.

10h30 ▶ CLÔTURE DES JOURNÉES THÈSES ▶ Espace Bar

11h30 ▶ Déjeuner

# Sessions posters et autres informations

Sessions posters Pages 91-119

► Sessions les mardi 20 mars (11 h 00)  
et mercredi 21 mars (13 h 30)

**Pôle Santé Environnement**

Résumés pages 91 à 103

**Pôle Sûreté Nucléaire**

Résumés pages 105 à 119

**Doctorants non présents** : résumés pages 121 à 128

Soirée débat : « Question « Privé », quel devenir  
avec un doctorat IRSN ? » Page 21

Conférence : « Il n'y a pas de programme génétique » Page 59

Soirée organisation ADI(N) Page 84

Devenir professionnel des doctorants de L'IRSN  
de 2009 à 2014 (Docteurs générations 2007 à 2013) Page 129

Présentation de l'ADI(N) Page 130 -131

*Le Centre de Ressources en Information Scientifique,*  
l'aide indispensable pour votre veille scientifique Page 132

*Propriété industrielle et brevets,*  
Protéger ses résultats scientifiques Page 133

Liste des participants Pages 134 -138

Liste des services et laboratoires  
d'appartenance des doctorants Pages 139 -140



➤ Lundi 19 mars

14h20

Salle Spectacle

## OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES

Jean-Christophe NIEL (Directeur général)

## PRÉSENTATION DE L'ADI(N)

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Le continuum environnemental**

**Présidente : Jacqueline Garnier-Laplace**

Directrice de l'unité de recherche Santé-Environnement  
Pôle Santé - Environnement

**Marine ROULIER** - Cycle biogéochimique de l'iode  
dans les écosystèmes forestiers.

**Eric LASCAR** - Comportement du radium et de ses ascendants  
radioactifs dans les sols et transfert dans les végétaux terrestres.

**Alexandre FLOURET** - Modélisation de la disponibilité du césium-137  
aux interfaces sol-solution-plante. Amélioration des outils  
expérimentaux déjà utilisés.

**Lucie STETTEN** - Spéciation et mobilité de l'uranium dans les sols  
et les sédiments lacustres situés en aval d'anciens sites miniers.

**Sujet de la thèse :****Cycle biogéochimique de l'iode dans les écosystèmes forestiers**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Marine ROULIER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LR2T</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric COPPIN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Florence PANNIER et Isabelle LE HECHO IPREM / LCABIE – UPPA / CNRS, UMR 5254</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Pau et des Pays de l'Adour, École Doctorale des Sciences Exactes (ED211)</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / Région Aquitaine</b>

---

Cette thèse s'inscrit dans le programme ANR-RNSR AMORAD (Amélioration des MOdèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des RADionucléides dans l'environnement).

L'ingestion d'iode radioactif pouvant avoir un impact sur les fonctions thyroïdiennes en cas de rejets accidentels d'installations nucléaires (accident de réacteurs type Tchernobyl et Fukushima ; site de stockage des déchets nucléaires ; installations médicales ou de recherche), comprendre le comportement environnemental de  $^{129}\text{I}$  et  $^{131}\text{I}$  est essentiel dans le cadre de la radioprotection des populations. Pour évaluer le risque à long terme de dispersion et d'accumulation de  $^{129}\text{I}$  après son rejet dans la biosphère, il est nécessaire d'avoir recours à une modélisation appropriée de son comportement. Du part leur superficie couvrant un tiers du territoire français et européen et de leur exploitation par l'homme (industrie du bois, alimentaire, loisirs), les écosystèmes forestiers représentent d'importants enjeux écologiques, économiques et sociétaux. En raison de leur longévité et du fort taux de renouvellement de leur biomasse, les forêts peuvent intercepter, accumuler puis recycler une quantité importante de radionucléides rejetés dans l'environnement. Les forêts pourraient ainsi influencer le cycle global de  $^{129}\text{I}$  avec des processus de transfert semblables à ceux de l'isotope stable  $^{127}\text{I}$ . Malgré quelques études sur les teneurs en iode dans les forêts, aucune information sur l'absorption, le stockage et le recyclage de l'iode n'est disponible pour ce type d'écosystème.

Pour combler ce manque de connaissances, trois approches complémentaires ont été utilisées :

- (i) Le cycle global de l'iode stable dans un écosystème forestier a été quantifié grâce à un suivi *in situ* de 3 ans permettant de déterminer l'évolution des teneurs en I dans la forêt de Montiers (partenariat avec l'Andra – Ope). Cette première partie a permis de paramétrer un modèle conceptuel décrivant les flux annuels d'iode dans un écosystème forestier.
- (ii) L'influence des conditions géographique et climatique sur la distribution et la spéciation de I stable dans les pluies, ainsi que l'influence des conditions environnementales (associations essences forestières / sols...) sur sa distribution dans les sols forestiers français a été déterminée à partir d'échantillons (sols, litières, humus, eaux de pluie, pluviollessiviats) provenant du réseau forestier français RENECOFOR (partenariat avec l'ONF).
- (iii) Enfin, l'humus étant un compartiment important à l'interface sol / atmosphère, une étude spécifique de 4 mois a été menée en laboratoire sur des humus de qualités différentes (mulls et moders) dopés en iode radioactif, afin d'évaluer l'impact de leur dégradation sur l'évolution de la (bio)disponibilité et de la volatilisation de l'iode.

## Sujet de la thèse :

Comportement du radium et de ses ascendants radioactifs dans les sols  
et transfert dans les végétaux terrestres

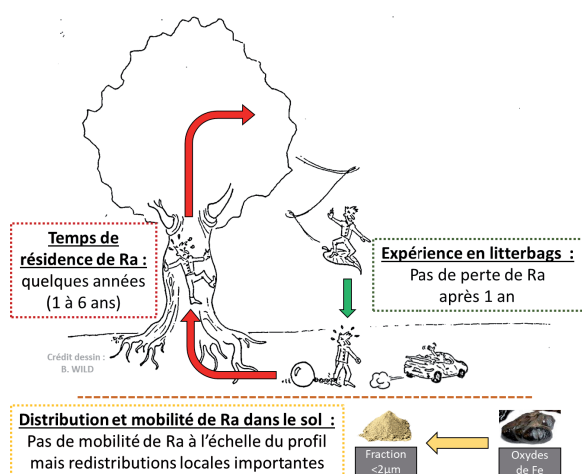
Doctorant :	Eric LASCAR
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	Université de Strasbourg / Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS) & PSE-ENV / LRTA
Tuteur de thèse :	Laurent POURCELOT / Philippe CALMON
Directeur de thèse :	Sophie RIHS / François CHABAUX (LHyGeS)
École doctorale :	Université de Strasbourg – ED413 (Sciences de la Terre)
Financement de thèse :	IRSN / ANDRA

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de la prévision du transfert des pollutions radioactives dans l'environnement, en s'intéressant au cas du radium ( $^{226}\text{Ra}$ ), émetteur alpha de longue période radioactive et descendant de l'uranium ( $^{238}\text{U}$ ).

L'objectif de cette étude est de caractériser le cycle biogéochimique du Ra au sein d'un écosystème forestier, en étudiant sa mobilité au sein des différents compartiments d'un système eau-sol- plante, à partir d'informations apportées par les déséquilibres radioactifs de la chaîne  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ - $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$ - $^{228}\text{Ra}$ .

Le projet s'appuie sur le site d'étude expérimental de la forêt de Montiers (site OPE de l'ANDRA, Meuse, France), sur lequel la composition en U, Th et Ra entre les différentes phases du sol (oxydes de fer et fraction  $<2\mu\text{m}$ ) a été déterminée, montrant une plus forte affinité du Ra avec la fraction  $<2\mu\text{m}$  en comparaison de l'U et du Th. Une absence de mobilité apparente de Ra à l'échelle du profil de sol a été mise en évidence, alors même que d'importantes redistributions locales de Ra ont lieu entre les différentes phases du sol.

Une expérimentation de dégradation *in-situ* de la litière de hêtre (*litterbags*) a été mise en place visant à caractériser la cinétique de lessivage des alcalino-terreux au cours de cette dégradation. Alors que 45% du magnésium est perdu durant la première année de dégradation, aucune perte en Ca, Sr, Ba et Ra n'est observée, laissant penser à une forte association de ces derniers avec la fraction macromoléculaire de la matière organique (MO). Une caractérisation de l'évolution de la MO au niveau moléculaire est réalisée, visant à identifier l'association de ces éléments chimiques avec la MO.



Le rapport isotopique  $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$  est utilisé comme chronomètre dans la végétation selon l'approche de Baeza *et al.* (1999). Ce rapport a permis d'évaluer un temps de résidence du Ra de l'ordre de quelques années dans une hêtraie, sans influence de l'âge de celle-ci.

Ainsi, ces résultats mettent en évidence une faible mobilité du Ra à l'échelle de l'écosystème forestier et mettent en évidence des cinétiques de recyclage par la végétation relativement lentes.

*Schéma conceptuel des principaux résultats obtenus sur le cycle biogéochimique du Ra dans le cadre de cette étude.*



**Sujet de la thèse :****Modélisation de la disponibilité du césium-137 aux interfaces sol-solution-plante.  
Amélioration des outils expérimentaux déjà utilisés**

---

Doctorant :	Alexandre FLOURET
Date du début de la thèse :	07 / 11 / 2016
Laboratoire :	PRP-ENV / SRTE / LR2T
Tuteur de thèse :	Laureline FEVRIER
Directeur de thèse :	François LAFOLIE – UMR EMMAH – INRA Avignon
École doctorale :	Aix – Marseille Université / ED 251 - Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / région PACA

---

De par ses propriétés de rétention et d'accumulation, le sol est à l'origine de transferts de radionucléides vers les compartiments de la chaîne trophique, entraînant *in fine* un risque potentiel pour la population. Les modèles et paramètres utilisés pour évaluer la mobilité des contaminants dans le sol et leur transfert aux plantes reposent sur une représentation simple de leur distribution, et ne permettent pas de décrire la variabilité observée selon le type de sol et / ou de plante considéré. L'objectif de cette thèse consiste à améliorer la prédiction de la mobilité du césium aux interfaces sol / solution / plante en proposant un modèle simple, mais applicable de manière générique pour une grande variété de sols et de plantes. Différents modèles seront confrontés à une série de données expérimentales : i) un modèle simple possédant un seul paramètre (Facteur de transfert racinaire à l'équilibre), et deux modèles plus prometteurs pour prédire la distribution du césium pour un large panel de sols et de plantes : ii) un modèle mécaniste (modèle thermodynamique décrivant les composantes réactives du sol, couplé à un modèle physiologique d'absorption racinaire), et iii) un modèle phénoménologique décrivant la cinétique de la mobilité du césium.

Trois sols naturels présentant des caractéristiques physico-chimiques variées, et deux plantes (la moutarde et le millet) présentant des capacités d'absorption contrastée du Cs, ont été choisis. Des premiers essais de modélisation ont été réalisés sur deux sols afin de tester l'applicabilité du modèle mécaniste (thermodynamique) pour décrire le comportement du Cs à l'interface sol / solution. Ils ont mis en évidence la sensibilité du modèle aux différents paramètres caractérisant la minéralogie du sol. Dans un second temps, une série d'expérimentation a été initiée pour acquérir i) des données sur la distribution du césium dans le continuum sol / plante et ii) des données sur les cinétiques des processus impliqués (absorption racinaire et désorption du Cs du sol). Les expériences de transfert sol / plantes sont réalisées à l'aide du dispositif RHIZOtest, système de culture dans lequel le sol étudié est entièrement sous l'influence des racines. Elles sont complétées par des expériences en condition statique et dynamique pour la caractérisation de la désorption du Cs du sol. L'ensemble des résultats acquis sur les trois sols et les deux types de plantes permettra i) d'évaluer les paramètres pouvant influencer la distribution du césium dans le continuum et ii) d'évaluer la robustesse et la capacité de réponse des modèles choisis.

## Sujet de la thèse :

Spéciation et mobilité de l'uranium dans les sols et les sédiments lacustres  
situés en aval d'anciens sites miniers

---

Doctorant :	Lucie STETTEN
Date du début de la thèse :	07 / 09 / 2015
Laboratoire :	PRP-DGE / SRTG / LELI et UPMC / IMPMC / MinEnv
Tuteur de thèse :	Arnaud MANGERET
Directeur de thèse :	Guillaume MORIN- Directeur de recherche CNRS-UPMC
École doctorale :	UPMC- Sorbonne / ED Géoscience, Ressource naturelle et environnement
Financement de thèse :	DIM R2DS IDF

---

En France, plusieurs zones situées en aval d'anciennes mines d'uranium sont concernées par des enrichissements en uranium. Ce piégeage, dans les sols et les sédiments, est susceptible de diminuer naturellement la concentration en uranium dans les eaux de surface. Toutefois, son efficacité et sa pérennité dépendent fortement de la nature et de l'évolution des phases porteuses de l'uranium ainsi que des conditions physico-chimiques du milieu de dépôt. La prédiction du comportement de l'uranium au niveau de ces zones représente donc un enjeu scientifique et environnemental important pour permettre une gestion adéquate de ces dépôts et anticiper la possible dispersion de l'uranium.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier la spéciation de l'uranium au niveau de deux zones enrichies en uranium, des sédiments lacustres (lac de Saint-Clément, Massif Central) et un sol situé au niveau d'une zone humide (Bretagne), et d'analyser les processus qui contrôlent son comportement redox et sa mobilité. Ces milieux sont caractérisés par la présence d'une zone réductrice et sont donc à priori propices à l'accumulation de l'uranium ; les formes réduites de l'uranium, U(IV), étant bien moins solubles que les formes oxydées, U(VI).

Les données de spéciation de l'uranium dans les solides, obtenues par spectroscopie d'absorption des rayons X et microscopie électronique à balayage ont permis (1) de mettre en évidence les transformations redox de l'uranium avec la profondeur ainsi que (2) de caractériser la nature des formes chimiques de l'uranium. Les analyses chimiques des solides et des eaux poreuses ont permis d'identifier les processus biogéochimiques majeurs régnant dans le milieu qui peuvent influencer le comportement redox et la mobilité de l'uranium. Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude des sédiments du lac de Saint-Clément suggèrent un contrôle important du redox de U par le relargage de  $\text{Fe(II)}_{\text{aq}}$  issu de la diagenèse précoce du sédiment<sup>1</sup>. L'observation de formes non cristallines de U(IV) et de minéraux phosphatés de U(IV) dans les sédiments<sup>1,2</sup> ainsi que dans le sol met en avant l'importance de prendre en compte ces espèces dans le contrôle de la mobilité de l'uranium dans de tels systèmes anoxiques. Des incubations en conditions oxygènes et anoxiques ont également été effectuées afin de mimer les variations redox du système et analyser l'évolution des phases porteuses de l'uranium. Des extractions chimiques permettront également de caractériser plus finement les formes chimiques de l'uranium et d'évaluer leur solubilité.

1. Stetten L., Mangeret A., Brest J., Seder-Colomina M., Le Pape P., Ikogou M., Zeyen N., Thouvenot A., Julien A., Alcalde, G., Reyss J.L., Bombléd B., Rabouille C., Olivi L., Proux O., Cazala C., Morin G. (2018) Geochemical control on the reduction of U(VI) to mononuclear U(IV) species in a contaminated lake sediment *Geochimica Cosmochimica Acta* 222, 171-186.

2. Morin G., Mangeret A., Othmane G., Stetten L., Seder-Colomina M., Brest J., Ona-Nguema G., Bassot S., Courbet C., Guillevic J., Thouvenot A., Mathon O., Proux O., Bargar J.R. (2016) Mononuclear U(IV) complexes and ningyoite as major uranium species in lake sediments, *Geochem. Persp. Let.* 2, 95-105.



➤ Lundi 19 mars

16 h30

Salle Spectacle

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Thermodynamique**

**Président : Michel Giot**

Professeur ordinaire émérite  
École Polytechnique de Louvain

**Adithya RAMANATHAN KRISHNAN** - Étude expérimentale et numérique par approche RANS et LES d'écoulements stratifiés turbulents.

**Romain HANOUZET** - Effets de pentes sur la propagation et le contrôle de fumées dans les galeries souterraines : application à la maîtrise du risque incendie dans le projet de centre de stockage Cigéo.

**Maxime MENSE** - Étude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée.

**Roberto CARUSO** - Analyse de propagation de flamme hydrogène-air-vapeur en présence de gouttes d'eau.

**Mohamed BELERRAJOUL** - Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules.

**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale et numérique par approche RANS et LES  
d'écoulements stratifiés turbulents**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Adithya RAMANATHAN KRISHNAN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>04 / 01 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA21 / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Fabien DUVAL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Prof. Pierre SAGAUT – M2P2, Aix-Marseille University Christophe FRIESS – M2P2, Aix-Marseille University</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>ED 353, Aix-Marseille University</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

In the framework of safety studies conducted by IRSN, an important issue concerns the risk of hydrogen accumulation in the upper part of the nuclear containment under the effect of buoyancy. Notably, this was the reason behind the Fukushima Daiichi powerplant explosion. The concentration levels of Hydrogen can be reduced under the effect of turbulent mixing through the use of re-combiner, turbulent round jet, etc. Eventually the question arises as to whether or not there exists a persistence of such stratification.

In this regard, as a first step, the aim of this work focuses on building a generic turbulence model to assess for constant density flows. For such flows, using standard RANS models is limited because of its predictive capabilities (need for an ad-hoc recalibration of the coefficients, wrong modeling assumptions, ..) while performing LES involves high computational costs. In this framework, the use of a hybrid RANS / LES approach seems to be attractive as it combines the relatively low computational cost of RANS models together with the predictive capabilities of LES approaches. The objective of this work is to develop and to study the potentialities of a seamless hybrid RANS / LES approach in an Equivalent Detached Eddy Simulation (EDES) framework. The proposed methodology can be extended to variable density flows.

Here, the systematic development of Menter's BaSeLine  $k-\omega$  model in an EDES framework is carried out. The model is a blend between the EDES formulation of Wilcox's  $k-\omega$  model and the EDES formulation of  $k-\epsilon$  model (in a  $k-\omega$  formulation) using Menter's blending function to alleviate the problem of numerical stiffness experienced by the  $k-\epsilon$  model coming from the damping functions that have stability issues and the freestream sensitivity of the  $k-\omega$  model. Subsequently, to further improve the predictive capability of the model which depends on the linear eddy-viscosity assumption, anisotropy effects associated with the subfilter stress tensor is also included, called as Explicit Algebraic Hybrid Stress Model (EAHSM). The explicit algebraic Reynolds stress model (built in a RANS framework) by Wallin and Johansson is put to use in a hybrid framework.

Turbulent channel flow at bulk Reynolds number of 10000 and square pipe flow simulations at bulk Reynolds number of 10320 have been performed. The results reveal that even at very coarse resolutions, the EAHSM model is predominantly better in comparison to the models based on the linear eddy-viscosity assumption. Currently, we are investigating if these results can be achieved using coarse resolutions at higher Reynolds numbers.

**Sujet de la thèse :****Effets de pentes sur la propagation et le contrôle de fumées dans les galeries souterraines : application à la maîtrise du risque incendie dans le projet de centre de stockage Cigéo**

Doctorant :	Romain HANOZET
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SA21 / LIE
Tuteur de thèse :	Samuel VAUX
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN - AMU
École doctorale :	Sciences pour l'ingénieur - ED 353 - Aix Marseille Université
Financement de thèse :	IRSN (cadre labo commun ETIC)

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Cigéo (Centre Industriel de stockage Géologique) visant à stocker des déchets radioactifs dans une couche géologique profonde. Ce site est constitué d'un réseau de galeries souterraines complexe présentant, localement, des pentes importantes (12%). Les déchets radioactifs sont stockés dans des alvéoles transverses à la galerie principale. Etant donné la présence de matière hautement radioactive et la complexité de l'installation, le départ d'un éventuel feu rendrait sa gestion délicate. La maîtrise de ce risque est donc primordiale afin de limiter les dégâts potentiels.

Dans ce type de configuration, l'impact de la pente sur la propagation des fumées apparaît comme une problématique majeure. Pour répondre à cet enjeu, des essais ont été réalisés sur une maquette aéraulique d'un tunnel à échelle réduite installée à l'IUSTI (Marseille). La maquette permet un contrôle de la pente (jusqu'à 18%). Un dispositif d'ensemencement et de contrôle de la masse volumique, par un mélange d'air et d'hélium, permet par similitude de reproduire la flottabilité et la température des fumées générées par un feu. Les mesures réalisées constitueront, à terme, une base de données permettant de valider les codes CFD (ISIS).

Dans un premier temps, nous nous focalisons sur l'avancée d'un courant de densité, issu d'un relargage instantané d'un volume de mélange air / hélium, au cours du temps dans un tunnel horizontal. L'impact de la masse volumique initiale du mélange est étudié pour caractériser les comportements d'écoulements Boussinesq (faible écart de densité par rapport au milieu ambiant) et non-Boussinesq (fort écart de densité). Les résultats permettent de mettre en évidence l'influence de la masse volumique sur la vitesse de propagation du courant de densité. Ensuite, des essais complémentaires de relargage d'un volume de mélange air / hélium ont été réalisés afin de quantifier l'effet de pente ainsi que l'effet du volume initialement relâché. A partir de ces essais, un nouvel adimensionnement est notamment proposé.

Enfin, l'étude des effets de pentes sur un relargage continu de flottabilité (air / hélium) a été réalisée. Les « fumées » générées par cette source sont évacuées en partie haute (en aval) par effet de flottabilité et une nappe de « fumées » stable (*backlayering*) se crée en partie basse (en amont) du tunnel. Les essais ont permis de mettre en évidence la dépendance de la longueur de cette nappe en fonction des caractéristiques de la source ainsi que de l'inclinaison du tunnel.



**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion  
à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée**

<b>Doctorant :</b>	<b>Maxime MENSE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LEF</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Hugues PRETREL - IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yannick PIZZO – CNRS IUSTI UMR 7343</b> <b>Bernard PORTERIE – Aix Marseille Université, CNRS IUSTI UMR 7343</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>AMU / ED 353 : Science Pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / région PACA</b>

Lors d'un incendie dans un milieu mécaniquement ventilé, le développement du feu peut conduire suivant la puissance du foyer et les conditions de ventilation, à une sous-oxygénation du milieu réactionnel, à l'extinction du foyer ou dans certains cas à l'apparition d'instabilités de combustion. Ces dernières se traduisent par des fluctuations basse fréquence (BF) importantes des grandeurs caractéristiques de l'incendie. Ces phénomènes oscillatoires peuvent avoir un impact direct sur la sûreté des installations nucléaires en entraînant notamment une dégradation du confinement dynamique et une perte d'intégrité des équipements de sectorisation. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de comprendre et de caractériser le phénomène physique afin de pouvoir prédire ses conditions d'apparition (type de foyer, régime de ventilation) et ses caractéristiques (fréquence, amplitude...). L'ensemble des données expérimentales permettra à terme, le développement et la validation des codes de calcul incendie sur ce type de scénario.

L'étude expérimentale porte sur la combustion de nappe de combustible dans une enceinte mécaniquement ventilée nommée NYX conçu pour la réalisation de cette thèse. Ce dispositif expérimental est une représentation à l'échelle  $\frac{1}{4}$  d'un local du dispositif DIVA. C'est un parallélépipède rectangle d'un volume de  $1.875\text{m}^3$  ( $1.5 \times 1.25 \times 1\text{m}$ ). Pour les essais présentés, nous avons fait varier le taux de renouvellement ( $Tr$ ) d'air dans l'enceinte, le diamètre du bac de combustible (12, 15.4, 18, 20, 24cm), la nature du combustible (heptane, dodécane) et la position de la bouche d'admission d'air. Les mesures effectuées concernent la perte de masse du combustible, la pression dans l'enceinte, la température du gaz dans la flamme et dans l'enceinte, la concentration en  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ , le débit d'admission et d'extraction.

Les mesures obtenues mettent en évidence le phénomène oscillatoire sur le débit de pyrolyse, la pression des gaz dans l'enceinte, la concentration en espèce chimique ( $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ ) et les températures de gaz. Ce comportement oscillatoire se traduit par un mouvement périodique de la flamme. On observe que lorsqu'on augmente le taux de renouvellement, pour un diamètre donné, la fréquence d'oscillations augmente et l'amplitude diminue. La gamme de valeurs de taux de renouvellement,  $Tr$ , pour lesquels nous avons des oscillations varie suivant le diamètre du bac et suivant le combustible. Enfin, la position de la bouche d'admission et son orientation modifient aussi les caractéristiques de ces oscillations. Les travaux en cours ont pour objectif de mieux comprendre les mécanismes d'apparitions de ces oscillations BF et ceux qui conduisent à l'extinction. Des simulations numériques seront envisagées afin d'étudier le champ de vitesse de l'entrée d'air et des expérimentations futures seront réalisées dans le but d'étudier les propriétés thermiques des parois.

**Sujet de la thèse :****Propagation Hydrogen-Air-Vapor Flame in presence of Water Droplets**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Roberto CARUSO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SAG / B2EGR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Ahmed BENTAIB</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Nabiha CHAUMEIX - CNRS</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>École doctorale de l'Université d'Orléans</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Projet ANR MITHYGÈNE</b>

---

Water Spray Systems are widely used to decrease the containment building pressure and to avoid fission products leak, in case of Severe Accident in Nuclear Power Plant. In this context, hydrogen may be produced from different processes leading to the formation of stratified mixtures with air and water vapor. The likelihood of the occurrence of an explosion within this cloud depends on several factors and in some cases can compromise the building integrity and subsequently the safety of the NPP.

In the case of a non-flammable mixture of hydrogen, water vapor and air, the use of Water Spray Systems may lead to "de-inertization" of the mixture through the condensation of steam on water droplets and to an increase of the turbulence in the gas phase. If the mixture is ignited, the subsequent flame propagation may lead to a dangerous regime of combustion: flame acceleration that could transit to detonation that will challenge and compromise the containment integrity. If there are some data in the literature for hydrogen / air flames (sigma criterion), its propagation in presence of water droplets is still insufficiently quantified. The state of art did not identify clearly the conditions for which the use of Water Spray (WS) can intensify, or mitigate, the severity of the explosion.

Preliminary Calculations and 1D Flames Simulations are conducted by using COSILAB software. The goal was to obtain the fundamental combustion parameters for hydrogen / air / water vapor mixtures such as the laminar flame thickness and laminar flame speed. These parameters are important when analyzing the interaction between the water spray and the flame.

The chosen nozzles, different in terms of generated droplets size, are selected to act on different aspects of the flame propagation: Thermal, Kinetics.

Experimental Data have been collected in a vertical acceleration flame tube: ENACCEF 1. This facility highly instrumented with Photomultipliers, Pressure Sensors and equipped with obstacles with different shapes and dimensions. This facility is equipped with windows to allow the implementation of Advanced Optical Diagnostics: Schlieren Technique, Tomography and Particle Image Velocimetry.

The characterization of the spray was performed in a second facility which consists of a PVC vertical tube with a similar internal diameter as ENACCEF 1. The spray features, in terms of volume diameter trend, the probability density function and the cumulative function, were determined using a laser particle diffraction system (Sympatec), at different heights of the pipe and for different nozzles. The spray density, for each injector, is characterized in qualitative terms, by using Light Scattering.

Finally, an experimental study has been conducted in order to evaluate the effect of the spray injection at different equivalence ratio on: the flame position, the flame propagation velocity and the pressure evolution inside ENACCEF 1.

**Sujet de la thèse :****Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Mohamed BELERRAJOUL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA21 / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Fabien DUVAL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel QUINTARD, Yohan DAVIT et Olivier SIMONIN (IMFT)</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace - Toulouse</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Les risques d'explosion de poussières sont fréquemment rencontrés dans les installations industrielles. Les secteurs industriels concernés sont nombreux (industrie pharmaceutique, céréalière,...) et les composés pulvérulents mis en jeu sont d'une grande diversité (matières organiques, métaux, ...). Dans le secteur nucléaire, les scénarios étudiés traitent par exemple le risque d'explosion de poussières de graphite lié aux opérations de démantèlement des réacteurs UNGG (*Uranium Natural Graphite Gaz*) ou les poussières de tungstène ou de béryllium qui peuvent être remises en suspension dans le tore ITER en cas d'accident de perte de vide.

Le problème considéré est un problème de combustion d'un mélange gaz-particules pour lequel il s'agit de développer un modèle permettant de prédire la vitesse laminaire de flamme pour différents types de particule. Cette vitesse constitue une des données d'entrée essentielle des modèles de vitesse de flamme turbulente utilisés pour estimer les risques d'explosion de poussière. En supposant que les échelles de variations significatives dans la phase porteuse et les échelles de variation locales induites par la présence des particules sont convenablement séparées, la démarche proposée consiste à décrire la phase continue de façon eulérienne et la phase dispersée de façon lagrangienne quasi-ponctuelle. Les développements sont ainsi menés dans le cadre d'une description multi-échelle, de l'échelle de la particule à l'échelle de description macroscopique.

Les équations de transport de la phase porteuse sont filtrées à une échelle beaucoup plus grande que la taille des particules, mais suffisamment petite devant l'échelle caractéristique des variations significatives dans la phase porteuse. A l'échelle du filtre, les termes d'échange entre la phase porteuse et les particules sont habituellement modélisés sur la base de résolution d'un problème de couche limite au voisinage d'une particule isolée. Dans cette thèse, nous proposons une démarche alternative pour dériver la description macroscopique Euler-Lagrange, en utilisant une méthodologie de changement d'échelle basée sur la méthode de prise de moyenne volumique. La méthodologie proposée permet de déterminer les termes d'échange entre la phase continue et les particules à partir de la résolution de problèmes de fermeture.

Nous nous intéressons dans un premier temps aux termes d'échange thermique pour un mélange gaz-particule dilué pour lequel un modèle multi-température est proposé, puis dans un deuxième temps, à la modélisation des termes sources chimiques homogènes et hétérogènes pour des particules de graphite. Des calculs analytiques et des simulations numériques sont réalisées dans le but de tester la validité des différents modèles proposés.

➤ **Lundi 19 mars**  
à 20h45 ➤ Salle Spectacle

## Soirée débat

« Question "Privé" quel devenir avec un doctorat IRSN ? »  
ou « Le doctorat IRSN, un passeport vers une carrière dans l'industrie et le privé ? »

Régulièrement, l'IRSN publie son rapport de Formation par la recherche, ce rapport s'appuie sur une enquête qui recense les emplois occupés après la soutenance du doctorat.

Ce type d'enquête menée à l'échelle nationale (ABG, Ministère) indique une diversification des emplois occupés par les salariés titulaires d'un doctorat. Le secteur privé, toutes activités confondues (industriel, tertiaire, etc) accueille de plus en plus de jeunes docteurs.

S'agit-il d'une tendance de fond ? Quelles sont les compétences, les qualités professionnelles, les outils développés durant la préparation du doctorat, et plus précisément à IRSN, qui favorisent un début de carrière hors du secteur académique ?

Le débat est ouvert...

Nous accueillerons pour cette occasion 4 anciens doctorants avec des parcours variés mais qui ont tous préparé et soutenu une thèse à l'IRSN. Ils présenteront la façon dont ils ont abordé le marché du travail, quels ont été et quels sont encore aujourd'hui leurs atouts, leurs faiblesses.

L'échange se fera aussi et surtout avec l'assemblée (jeunes et moins jeunes chercheurs IRSN, universitaires, etc), chacun ayant eu à se poser la question de la valorisation de son parcours et du rôle joué par la formation par la recherche.

### Avec

- **Caroline Rouas** (docteur en 2010, Safety in Vitro study on fla - Team Manager - L'Oréal)
- **Sylvain Meylan** (docteur en 2016, Dirigeant et fondateur - Symalgo Technologies)
- **Jackie Tav** (docteur en 2017, Ingénieur applications - eLichens)
- **Cyprien Jaillet** (docteur en 2017, Consultant en financement de l'innovation - Leyton)



**➤ Mardi 20 mars**

08 h 30 Salle Spectacle

**SESSION PLÉNIÈRE****Dosimétrie****Président : Joachim Miss**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Manon JACQUEMIN** - Évaluation dosimétrique suite au radiomarquage de cellules *in vitro* avec des radionucléides émetteurs  $\beta^+$  pour le suivi de cellules *in vivo* par imagerie TEP : étude de la relation dose-effet et optimisation de protocoles.

**Tiffany BEAUMONT** - Impression 3D de fantômes anthropomorphes et démonstration de leur utilité en dosimétrie interne.

**Nicolas TKATCHENKO** - Développement de la spectroscopie de résonance paramagnétique électronique (RPE) des ongles pour la dosimétrie d'accidents radiologiques.



## Sujet de la thèse :

Évaluation dosimétrique suite au radiomarquage de cellules *in vitro*  
avec des radionucléides émetteurs  $\beta^+$  pour le suivi de cellules *in vivo* par imagerie TEP :  
étude de la relation dose-effet et optimisation de protocoles

Doctorant :	Manon JACQUEMIN
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSE-SAN / SDOS / LEDI
Tuteur de thèse :	Aurélié DESBRÉE
Directeur de thèse :	Didier FRANCK
École doctorale :	Université Paris-Sud - PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN

Le marquage de cellules *in vitro* avec un radionucléide combiné à l'imagerie non-invasive TEMP / TEP permet le suivi *in vivo* de cellules d'intérêt injectées dans l'organisme du patient [1,2]. En diagnostic clinique, cette méthode est utilisée pour détecter des foyers infectieux ou inflammatoires via l'administration de leucocytes radiomarqués. Elle peut être également utilisée avec des cellules mésenchymateuses, en recherche clinique, afin d'évaluer l'efficacité d'une thérapie cellulaire reposant sur l'administration de ces cellules thérapeutiques [1].

Cette technique d'imagerie présente toutefois des limites en raison de l'étape de radiomarquage *in vitro* durant laquelle les cellules sont incubées avec une quantité d'activité généralement très importante par rapport au volume considéré et donc particulièrement exposées à la radioactivité.

De sévères dommages à la cellule liés au radiomarquage ont ainsi pu être mis en évidence avec altération de fonctionnalités et / ou diminution de la viabilité [3,4]. Malheureusement, les données de la littérature expliquant ces résultats peuvent être assez hétérogènes et les comparaisons délicates car l'aspect dosimétrique est peu traité.

En réponse à cette problématique, l'objectif de cette thèse est de proposer des protocoles de marquage appliqués à différents types de cellules, optimisés à partir d'évaluations dosimétriques, pour établir une relation dose-effet et permettre un meilleur suivi cellulaire par imagerie en limitant les altérations des fonctions et propriétés biologiques induits par le marquage.

Pour ce faire, dans un premier temps, le développement d'un modèle à l'échelle multi-cellulaire permettant le calcul précis de la dose moyenne à la cellule a été réalisé à l'aide de simulations Monte-Carlo (code MCNP6) et du logiciel Python.

A partir de ce modèle, une première étude a été effectuée pour 3 radionucléides utilisés en imagerie TEP: F-18, Cu-64, Ga-68. Pour réaliser les calculs, une distribution de cellules en réseau cubique à différentes compacité a été considérée. Les résultats ont montré que la compacité pouvait influencer significativement sur les valeurs de doses à la cellule, pour une même activité par cellule. Une comparaison de doses calculées avec les méthodes de dosimétrie cellulaire et conventionnelle a également permis d'étudier les conditions limites de la dosimétrie conventionnelle en fonction de la densité cellulaire et de l'efficacité de marquage. Il a notamment été observé que le Cu-64 présentait les différences les plus marquées entre les doses cellulaires et doses conventionnelles, particulièrement aux faibles compacités, du fait principalement des électrons Auger de faible parcours émis par le radionucléide. Ainsi, il apparaît que la dose conventionnelle peut sous-estimer jusqu'à 4 fois la dose moyenne à la cellule dans des conditions de marquage standards.

En perspectives, des expériences de marquages suivies de tests de fonctionnalité cellulaire pour l'étude des effets radioinduits e.g. viabilité, clonogénicité, prolifération, seront réalisées dans différentes conditions de marquages.

- [1] Kircher, M. F., Gambhir, S. S., & Grimm, J. (2011). "Noninvasive cell-tracking methods". *Nature Reviews Clinical Oncology*, 8, 677. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/nrclinonc.2011.141>
- [2] Mirpour, S., & Gholamrezanezhad, A. (2011). Clinical Stem Cell Imaging and In vivo Tracking.
- [3] Gholamrezanezhad, A., Mirpour, S., Bagheri, M., & Mohamadnejad, M. (2011). In vivo tracking of 111 In-oxine labeled mesenchymal stem cells following infusion in patients with advanced cirrhosis. *Nuclear Medicine and Biology*, 38(7), 961-967. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2011.03.008>
- [4] Miñana, E., Roldán, M., Chivato, T., Martínez, T., & Fuente, T. (2015). Quantification of the chromosomal radiation damage induced by labelling of leukocytes with [18F]FDG. *Nuclear Medicine and Biology*, 42(9), 720-723. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2015.05.002>

**Sujet de la thèse :****Impression 3D de fantômes anthropomorphes  
et démonstration de leur utilité en dosimétrie interne**

<b>Doctorant :</b>	<b>Tiffany BEAUMONT</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>07 / 09 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SDOS / LEDI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>David BROGGIO</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Didier FRANCK - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / Pheniics</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

En cas d'incorporation accidentelle d'iode radioactif, le risque de développer un cancer radio-induit de la thyroïde est plus important pour les enfants que pour les adultes. Actuellement, la mesure *in vivo* est étalonnée avec un fantôme thyroïdien adulte ce qui induit des incertitudes de mesure non négligeables pour les enfants. Afin d'améliorer la mesure de l'iode retenu dans la thyroïde, un jeu de fantômes thyroïdiens réalistes adaptés aux enfants a été développé et imprimé en 3D.

Les fantômes ont été modélisés à l'aide d'un logiciel d'infographie 3D et représentent différentes classes d'âges (5, 10, 15 ans et l'adulte). Le cou, la colonne vertébrale, la moelle épinière et la trachée ont également été modélisés pour créer le fantôme final. La fabrication a été optimisée afin de reproduire une atténuation réaliste, de garantir la robustesse et l'étanchéité du fantôme. Ce jeu de fantôme thyroïdien a été breveté (n°FR1650855).

Pour les besoins de la surveillance de routine ou les mesures de la population en cas de crise, les efficacités de comptage des détecteurs germanium et NaI(Tl) ont été mesurées pour chaque fantôme. La différence d'efficacité entre le fantôme 5 ans et l'adulte est de 25% pour le détecteur germanium contre 46% pour le NaI(Tl), pour une mesure au contact. Une étude systématique a permis de montrer que quelle que soit la distance de mesure, l'efficacité de comptage varie linéairement avec le volume thyroïdien. Un modèle mathématique, reproduisant la variation de l'efficacité avec la distance, a également été déterminé. Cette étude montre que le terme dominant les erreurs de positionnement est la distance entre le détecteur et la thyroïde.

Une autre application de ces fantômes concerne les pathologies bénignes de la thyroïde. Un jeu de fantôme similaire a ainsi été utilisé dans plusieurs services de médecine nucléaire afin d'améliorer la mesure de l'activité retenue dans la thyroïde. Ces mesures ont été réalisées dans 3 hôpitaux différents et en utilisant deux isotopes de l'iode ( $^{131}\text{I}$  et  $^{123}\text{I}$ ).

Pour la mesure de  $^{131}\text{I}$  avec une sonde NaI(Tl), le facteur d'étalonnage utilisé en routine clinique est modifié entre -2% et +8% selon le volume thyroïdien. Des acquisitions planaires avec les gamma-camera de ces 3 hôpitaux ont été réalisées afin de quantifier l'impact du volume sur le facteur d'étalonnage. L'analyse des données est en cours.

En parallèle de ce travail, des fantômes de poitrine sont actuellement développés par impression 3D afin d'améliorer la mesure pulmonaire des actinides chez les travailleuses du nucléaire. La présentation de ces travaux étant soumise au dépôt de brevet, aucun détail technique ne peut être révélé.

**Sujet de la thèse :****Développement de la spectroscopie de résonance paramagnétique électronique (RPE)  
des ongles pour la dosimétrie d'accidents radiologiques**

<b>Doctorant :</b>	<b>Nicolas TKATCHENKO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>21 / 09 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SDOS / LDRI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>François TROMPIER</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Didier GOURIER – Chimie Paris (CNRS)</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>UPMC / Physique et Chimie des Matériaux, ED 397</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

En cas d'irradiations aiguës localisées aux mains, il est compliqué d'estimer la dose reçue par la victime. Jusqu'à présent, seule l'analyse RPE de prélèvements osseux pouvait fournir cette information mais avec un champ d'application limité. L'IRSN développe une approche innovante basée sur la quantification par spectroscopie de résonance paramagnétique électronique (RPE) des radicaux libres radio-induits dans les ongles. Si cette approche présente de nombreux avantages (facilité du prélèvement, cartographie de la dose absorbée) l'analyse des spectres RPE s'avère complexe et de nombreux paramètres influent sur la production et la stabilité des radicaux mesurés. En outre, les spectres RPE d'ongles irradiés sont composés de deux signaux superposés ayant des caractéristiques spectrales similaires mais dont l'origine diffère : un signal endogène dont l'intensité, variable d'un individu à l'autre, est directement liée au taux d'humidité, et un signal radio-induit stable mais dont l'intensité est très faible. Par conséquent, le défi réside dans la caractérisation des entités chimiques associées à ces signaux afin de développer des méthodes de discrimination des différentes composantes du spectre pour permettre d'extraire les informations dosimétriques. La nature radicalaire de ces signaux était jusqu'alors inconnue. Plusieurs expériences chimiques combinées à des simulations numériques ont été réalisées et soutiennent fortement l'hypothèse que ces signaux proviennent tous deux de la même espèce paramagnétique : un radical o-semiquinone anionique formé à partir de la tyrosine.

Une étude multiparamétrique sur la variabilité du signal endogène inter-individus (en fonction de la teneur en eau, l'exposition aux rayonnements UV ou la température) a également été menée. En raison de la forte variabilité de son intensité notamment entre les individus (jusqu'à 300 %), il n'est pas possible d'extraire la composante dosimétrique simplement en soustrayant un signal endogène moyen au signal mesuré et de nouvelles approches sont en cours d'étude. Enfin, afin de diminuer les incertitudes associées aux variables d'intérêt (intensités, largeur des raies ...) et donc les erreurs sur les doses estimées, nous développons en collaboration avec l'Institut de recherche de Chimie Paris (IRCP) une nouvelle façon de traiter les spectres RPE à l'aide de polynômes de Tchebychev. Des résultats très prometteurs ont d'ores et déjà été obtenus. Après une caractérisation complète du bruit du spectromètre, nous sommes maintenant en mesure de le réduire correctement sur les données expérimentales. L'outil numérique ainsi développé permet d'extraire les variables d'intérêt de manière fiable, robuste et surtout automatique, ouvrant la voie à une harmonisation des résultats inter-laboratoires et ce, dans tous les champs d'application de spectroscopie RPE.

**➤ Mardi 20 mars**

09 h 50 Salle Tournette

**SESSION PARALLÈLE****Dépôt / mise en suspension****Présidente : Nathalie Lemaitre,**

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Benjamin BLAISOT** - Étude de la mobilisation d'aérosols par flashage de jet liquide : application à la problématique des poussières au cours d'une perte de vide par entrée d'eau dans ITER.

**Alexis DÉPÉE** - Approche microphysique du lessivage des aérosols radioactifs par les nuages : influence de la charge électrique des aérosols.

**Laura LINTIS** - Étude des mécanismes de sorption de l'eau sur des aérosols solides émis lors d'incendies : détermination des paramètres physico-chimiques d'influence.

**Sujet de la thèse :****Étude de la mobilisation d'aérosols par flashage de jet liquide :  
application à la problématique des poussières  
au cours d'une perte de vide par entrée d'eau dans ITER**

Doctorant :	Benjamin BLAISOT
Date du début de la thèse :	03 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LPMA
Tuteur de thèse :	Emmanuel PORCHERON
Directeur de thèse :	Véronique ROÏG – IMFT Toulouse
École doctorale :	INPT / Mécanique, énergétique, génie civil, procédés (MEGEP) - ED468
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre de la construction du réacteur de fusion ITER, il est nécessaire pour l'IRSN de disposer de connaissances pour évaluer les termes sources de contamination susceptibles d'être relâchés dans l'environnement lors de différents scénarios d'accidents, suite à l'endommagement de la chambre à vide conduisant à la rupture du confinement des particules contaminées ou activées. Dans le cas d'une perte de vide accidentelle causée par la rupture d'une canalisation du circuit de refroidissement, de l'eau sous pression et surchauffée peut être injectée dans la chambre du tokamak. Ce type d'accident est appelé ICE pour Ingress of Coolant Event.

Cette eau va se vaporiser brutalement du fait du changement de pression, passant de plusieurs bars au vide ( $10^{-7}$  Pa dans le tore d'ITER). Cette vaporisation, aussi appelée *flash-boiling*, provoque une évaporation rapide du liquide dès la sortie du jet voire même dans le circuit de refroidissement en amont de la brèche. De cette évaporation découle une atomisation violente par effet thermique, semblable à de l'atomisation effervescente, qui disperse le liquide à des angles pouvant dépasser les  $90^\circ$ .

Au sein d'ITER, les parois métalliques du tore seront érodées par le plasma, ce qui produira des poussières de béryllium et de tungstène, lesquelles peuvent être mobilisées lors de l'ICE.

L'évaluation des conséquences d'explosions de poussières et d'hydrogène sur la tenue du confinement nécessite donc d'étudier les phénomènes physiques influençant la mobilisation des poussières dans la chambre à vide.

Des essais d'injection d'eau surchauffée ont été effectués dans une chambre à vide permettant l'utilisation de l'ombroscopie comme diagnostic optique. Ces essais ont été réalisés pour des températures allant de la température ambiante jusqu'à  $140^\circ\text{C}$ , proche des conditions d'ITER. Ils ont mis en évidence l'évolution de la morphologie du spray et de la vitesse des gouttes en fonction de la surchauffe.



Prochainement, des essais seront effectués afin d'étudier les interactions entre le spray et un dépôt d'aérosols. L'utilisation de la technique de PIV rapide dans ces expérimentations permettra de mesurer la vitesse de mobilisation des aérosols et d'estimer la vitesse du flux de vapeur résultant de la vaporisation du jet liquide.

*Spray en transition vers le flashing  
(Conditions : 5 mbar,  $32^\circ\text{C}$ )*

**Sujet de la thèse :****Approche microphysique du lessivage des aérosols radioactifs par les nuages :  
influence de la charge électrique des aérosols**

<b>Doctorant :</b>	Alexis DÉPÉE
<b>Date du début de la thèse :</b>	03 / 11 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PSN-RES / SCA / LPMA
<b>Tuteur de thèse :</b>	Pascal LEMAÎTRE et Anne MATHIEU
<b>Directeur de thèse :</b>	Andrea FLOSSMANN
<b>École doctorale :</b>	Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand Université Clermont Auvergne École Doctorale des Sciences Fondamentales
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

Pour prédire les conséquences radiologiques d'un accident nucléaire, l'IRSN développe des modèles simulant la dispersion et le dépôt des aérosols radioactifs dans l'environnement. A l'échelle continentale, le dépôt des aérosols est essentiellement lié au dépôt humide, plus précisément au lessivage par les nuages (*rainout*). Ma thèse a pour but d'améliorer la modélisation du *rainout*. Je me focalise sur les aérosols radioactifs dont les propriétés électriques influent leur collecte par les gouttelettes du nuage.

Premièrement, j'ai développé un programme de calcul de la collecte d'aérosols par des gouttelettes. Celui-ci prend en compte les forces électrostatiques induites par les charges des aérosols radioactifs et des gouttelettes, les effets inertiels et le mouvement Brownien des aérosols. Le calcul est basé sur un suivi lagrangien des aérosols submicroniques (rayon  $\in [4 \text{ nm}; 1,3 \mu\text{m}]$ ) autour de microgouttelettes en chute libre. Le mouvement Brownien est modélisé suivant l'approche de Langevin, couplée à une méthode de Monte-Carlo. Cette approche montre que la charge électrique spécifique<sup>[1]</sup> des particules radioactives induit une augmentation de plusieurs ordres de grandeur de leur efficacité de collecte par les gouttelettes.

Comme il n'existe aucune donnée expérimentale pour valider ce modèle, j'ai conçu un banc d'essais inspiré de l'expérience CLINCH<sup>[2]</sup> développée à l'université de Lausanne. Ce banc est constitué d'une chambre cylindrique thermostatée où des microgouttelettes (monodispersées et monochargées) chutent à leur vitesse terminale dans un flux d'aérosols (monodispersés et monochargés). Les gouttelettes sont produites par un générateur piézoélectrique, leur charge est asservie grâce à un anneau d'induction que j'ai développé et qualifié. Les aérosols monodispersés sont produits par l'atomisation d'une solution de billes de latex fluorescentes, dont la dispersion granulométrique est contrôlée par un analyseur différentiel de mobilité électrique. Le contrôle de la charge des aérosols est en cours de développement. Cette deuxième année de thèse sera donc consacrée à la validation de mon modèle lagrangien à l'aide de cette expérience. Ces mesures seront intégrées au modèle DESCAM (DEtailed SCAvenging Model) qui permet de modéliser un nuage de sa formation jusqu'aux précipitations. A l'aide de ces simulations, des paramétrisations théoriques du lessivage par les nuages seront établies et pourront être implémentées aux modèles de l'IRSN.

[1] Clement, C. F., & Harrison, R. G. (1992). The charging of radioactive aerosols. *Journal of aerosol science*, 23(5), 481-504.

[2] Ladino, L., Stetzer, O., Hattendorf, B., Günther, D., Croft, B., & Lohmann, U. (2011). Experimental study of collection efficiencies between submicron aerosols and cloud droplets. *Journal of the atmospheric sciences*, 68(9), 1853-1864.



## Sujet de la thèse :

Étude des mécanismes de sorption de l'eau sur des aérosols solides émis lors d'incendies :  
détermination des paramètres physico-chimiques d'influence

Doctorant :	Laura LINTIS
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LPMA
Tuteur de thèse :	François-Xavier OUF
Directeur de thèse :	Cécile VALLIÈRES – LRGP / SAFE
École doctorale :	Université de Lorraine
	Ressources, Procédés, Produits et Environnement RP2E - ED 410
Financement de thèse :	IRSN

Lors d'un incendie dans une installation nucléaire de base (INB), les filtres à très haute efficacité (THE) sont colmatés en conditions humides par des suies. Afin de mieux prédire le comportement de ces filtres et la perte de charge occasionnée par le gâteau de suies, l'IRSN travaille sur un modèle de colmatage. Ce dernier est basé sur différents travaux et fait intervenir des paramètres relatifs aux suies et à leur caractère hydrophile [1]. La prise en compte du phénomène de sorption suivi de la condensation de l'eau sur le dépôt de suies représente une étape nécessaire à la meilleure compréhension du processus de colmatage [2]. Cette étude consiste à déterminer les paramètres d'influence relatifs aux suies sur le phénomène de sorption de l'eau.

Des suies sont produites à partir de combustibles isolés retrouvés dans les INB et à différentes teneurs en dioxygène. D'autres échantillons sont issus de feux d'éléments complexes (câbles / armoires électriques, boîte à gants) effectués à grande échelle dans deux installations de l'IRSN différentes de par leur type de ventilation. Des analyses physico-chimiques ex-situ sont effectuées afin de déterminer la morphologie, la composition élémentaire ainsi que la surface spécifique. Les mesures de sorption d'eau effectuées avec la microbalance DVS ("Dynamic Vapour Sorption") ont permis d'ores et déjà d'identifier certains paramètres d'influence sur la sorption.

Cette étude a permis d'une part de mettre en évidence l'impact de la teneur en dioxygène du gaz sur les propriétés granulométriques et physico-chimiques des suies. Si la porosité des échantillons n'a que peu d'effet, une diminution de la taille des particules primaires des agrégats implique une augmentation

significative de la prise de masse en eau (cf. Figure). Les isothermes d'eau de types II et V, obtenus pour les suies réelles d'incendie et les suies issues de l'échelle analytique respectivement, révèlent un mécanisme d'adsorption de type « multicouche » [3]. Leur prise de masse en eau respective de 40% et 5% à une humidité relative de 80% démontre un caractère hydrophile évident pour les suies réelles d'incendie. L'échelle du feu combiné à la complexité du combustible a donc un impact sur l'affinité eau / suies.

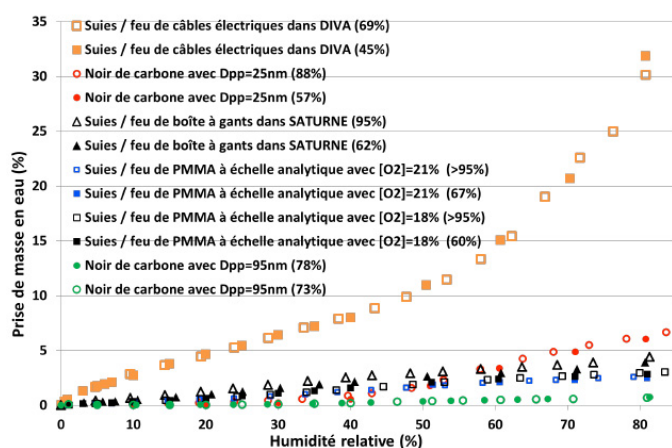


Figure : Isothermes d'adsorption d'eau à 25 °C sur différents agrégats de nanoparticules carbonées avec différentes porosités apparentes des échantillons

- [1] Ouf, F.-X., Mocho, V.-M., Pontreau, S., Wang, Ferry, D., & Yon, J. (2014). Clogging of Industrial High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filters in Case of Fire : From Analytical to Large- Scale Experiments. *Aerosol Science and Technology*, 48(September), 939 – 947
- [2] Ribeyre, Q., Grévillet, G., Charvet, A., Vallières, C., & Thomas, D. (2014). Modelling of water adsorption-condensation isotherms on beds of nanoparticles. *Chemical Engineering Science*, 113, 1–10.
- [3] Rouquerol, F. et al. (2014). *Adsorption by Powders and Porous Solids. (Elsevier, 2nd Edition)*

**➤ Mardi 20 mars**

09 h 50 Salle Spectacle

**SESSION PARALLÈLE****Faibles doses****Présidente : Céline Dinocourt**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Caroline ARCANJO** - Évaluation des modes d'action toxique de l'eau tritiée sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*) : de l'ADN à l'individu.

**Alice BONTEMPS** - Étude de la réponse adaptative au niveau rénal après exposition chronique à de faibles concentrations d'uranium ou de fluor : identification des voies de signalisation impliquées lors d'expositions *in vivo* et *in vitro*.

**Ségolène BOUET RIVOAL** - Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses au sein de cohortes de travailleurs du cycle de l'uranium.

**Sujet de la thèse :****Évaluation des modes d'action toxique de l'eau tritiée sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*) : de l'ADN à l'individu**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Caroline ARCANJO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV / SRTE / LECO</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Béatrice GAGNAIRE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Aix-Marseille / ED 251 - Sciences de l'Environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / EDF</b>

---

En France, l'eau tritiée (HTO) est principalement rejetée, en fonctionnement normal, par les CNPE et les centres de retraitement des combustibles usés. La future utilisation de la fusion thermonucléaire (ex. ITER) sera susceptible d'accroître son rejet dans l'environnement. Il est donc essentiel d'évaluer son impact sur les écosystèmes, notamment aquatiques, qui sont des milieux récepteurs des effluents liquides des centrales.

Cette thèse vise à évaluer les modes d'action toxique de l'HTO sur les stades précoces du poisson zèbre (*Danio rerio*). Le premier axe vise à caractériser l'internalisation du tritium afin de déterminer la dose absorbée. Le second axe se focalise sur les effets biologiques.

Des œufs ont été contaminés à l'HTO afin d'obtenir des débits de dose théoriques de 0,4 et 4mGy.h<sup>-1</sup>, puis échantillonnés à différents stades. Afin d'évaluer l'internalisation d'HTO, un protocole de préparation des échantillons reproductible a été validé. Les effets ont été analysés à des échelles biologiques pertinentes d'un point de vue toxicologique et écologique : la molécule (dommages à l'ADN, transcriptome), l'organe (muscle, œil) et l'individu (développement, comportement).

Les débits de dose calculés à partir des activités mesurées après 24 h et 96 h de contamination sont cohérents avec ceux attendus. L'analyse transcriptomique a révélé une modulation de gènes impliqués dans la contraction musculaire et le développement de l'œil avec des schémas d'expression opposés selon le débit de dose considéré. Ces résultats suggèrent la mise en place de mécanismes compensatoires à 0,4mGy.h<sup>-1</sup>, via la surexpression de gènes, et de mécanismes protecteurs à 4mGy.h<sup>-1</sup>, via la sous-expression de gènes potentiellement due à la compaction de la chromatine. Une surexpression de gènes impliqués dans la réparation de l'ADN a été observée après 96hpf à 0,4mGy.h<sup>-1</sup>, mais dès 24hpf à 4mGy.h<sup>-1</sup>, suggérant la mise en place de processus de réparation tardifs à 0,4mGy.h<sup>-1</sup> et plus précoces à 4mGy.h<sup>-1</sup>. L'analyse des dommages à l'ADN semble confirmer cette hypothèse, aucune différence n'ayant été observée entre les individus témoins et contaminés à 4mGy.h<sup>-1</sup>. Pour évaluer si les effets observés au niveau moléculaire étaient retrouvés à un niveau biologique supérieur, des analyses de tissus ont été réalisées en microscopie électronique. Des dommages sur les sarcomères ont été mis en évidence au deux débits de dose. Pour évaluer si ces effets pouvaient impacter l'intégrité des organismes, des analyses comportementales vont être réalisées. Ces résultats permettront d'avancer dans la compréhension des mécanismes d'action toxique de l'HTO sur les stades précoces d'un vertébré à différents niveaux d'organisation biologique et de mieux comprendre les mécanismes qui les lient. Ces résultats pourront également être comparés avec les réponses analogues observées chez des larves exposées à une irradiation gamma externe.

**Sujet de la thèse :**

**Étude de la réponse adaptative au niveau rénal après exposition chronique à de faibles concentrations d'uranium ou de fluor : identification des voies de signalisation impliquées lors d'expositions *in vivo* et *in vitro***

**Doctorant :** Alice BONTEMPS  
**Date du début de la thèse :** 03 / 10 / 2016  
**Laboratoire :** PSE-SANTÉ / SESANE / LROTX  
**Tuteur de thèse :** Yann GUÉGUEN  
**Directeur de thèse :** Olivier BARBIER – CINVESTAV (Mexique) et Yann GUÉGUEN  
**École doctorale :** Paris-Sud 11 / ED569, Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué  
**Financement de thèse :** IRSN

---

L'uranium et le fluor sont deux substances néphrotoxiques auxquelles l'Homme peut être exposé à faible dose. Des études menées dernièrement à l'IRSN et au CINVESTAV ont suggéré qu'une exposition chronique à faible concentration d'uranium ou de fluor pouvait entraîner une réponse adaptative au niveau rénal. L'objectif de ce travail de thèse est de mettre en évidence expérimentalement la réponse adaptative, et d'en identifier les mécanismes moléculaires et voies de signalisation sous-jacents. Des protocoles d'exposition spécifiques sont mis en place : l'exposition chronique à de faibles doses « prime » est réalisée afin d'observer si cela confère un effet protecteur ou non vis-à-vis d'une dose « challenge » plus fortement concentrée.

*In vivo* sur des souris C57BL / 6J, nous avons évalué plusieurs concentrations « challenge » de fluor (2-10 mg.kg<sup>-1</sup>) ou d'uranium (2-5 mg.kg<sup>-1</sup>) administrées en aigu, et plusieurs délais (48h et 72h). Les analyses biochimiques urinaires et rénales, histologiques ainsi que géniques (néphrotoxicité, apoptose, dommage à l'ADN et inflammation) ont permis de choisir la concentration de 7.5 mg.kg<sup>-1</sup> et un délai de 72h pour le fluor. Pour l'uranium, les analyses effectuées jusqu'à présent (biochimie urinaire, diurèse, observations macroscopiques) doivent être confirmées histologiquement avant de retenir la concentration de 5 mg.kg<sup>-1</sup>. Des animaux sont en cours de contamination chronique par l'eau de boisson afin de déterminer la dose « prime » pour le fluor (15-50 mg.L<sup>-1</sup>) et l'uranium (10-40 mg.L<sup>-1</sup>). Les mécanismes impliqués dans la réponse adaptative seront étudiés *via* l'expression de gènes et de protéines, ainsi que l'activité d'enzymes spécifiques du statut redox, de l'inflammation, de l'autophagie et de la réparation de l'ADN.

*In vitro*, sur le modèle de cellules rénales humaines HK-2, les tests phénotypiques permettant de définir l'intégrité et la fonctionnalité des cellules (mortalité, apoptose, prolifération, capacité migratoire et activités enzymatiques rénales) ont été validés. Les expérimentations réalisées ont permis de choisir la dose « challenge » d'uranium de 500µM car ces conditions entraînent de légers changements phénotypiques (capacité migratoire et prolifération cellulaire) susceptibles d'être amoindris par une dose « prime ». Les analyses pour le fluor sont en cours.

La dernière partie de la thèse visera à identifier les voies moléculaires impliquées dans les mécanismes adaptatifs et à tester ces hypothèses *in vitro* par une approche d'invalidation de gènes ou d'induction pharmacologique des cibles identifiées.

L'identification des mécanismes impliqués dans la réponse adaptative à faible dose devrait permettre d'améliorer l'évaluation des risques sanitaires d'exposition chronique à l'uranium et au fluor.

**Sujet de la thèse :****Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses  
au sein de cohortes de travailleurs du cycle de l'uranium**

---

<b>Doctorant :</b>	Ségolène BOUET-RIVOAL
<b>Date du début de la thèse :</b>	05 / 10 / 2015
<b>Laboratoire :</b>	PSE-SAN / SESANE / LEPID
<b>Tuteur de thèse :</b>	Olivier LAURENT- IRSN
<b>Directeur de thèse :</b>	Dominique LAURIER- IRSN
<b>École doctorale :</b>	Université Paris Sud / école doctorale de Santé Publique
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

L'évaluation des risques associés à l'incorporation de radionucléides et l'élaboration des normes de radioprotection en résultant restent principalement basées sur les résultats du suivi épidémiologique de populations exposées aux rayonnements ionisants par voie externe. Les analogies et extrapolations employées par la Commission Internationale de Protection Radiologique sont entourées d'incertitudes. Afin de pouvoir évaluer la validité des hypothèses retenues, il est nécessaire de réaliser des nouvelles études épidémiologiques au sein de populations exposées à des émetteurs internes. Par ailleurs, alors que les effets cancérogènes des rayonnements ionisants sont établis et de mieux en mieux caractérisés, l'hypothèse d'un effet de faibles doses sur le développement de maladies de l'appareil circulatoire doit être évaluée de manière approfondie.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à améliorer la connaissance des effets des expositions à de faibles doses de rayonnements ionisants, en particulier du fait de contaminations internes.

Le premier axe de la thèse a consisté en l'analyse de la mortalité dans une nouvelle cohorte de 1 300 travailleurs des usines de traitement du minerai d'uranium (cohorte F-MILLERS), par comparaison avec la population nationale et locale française. Un « effet du travailleur sain » a seulement été observé en comparaison avec la population nationale. Plusieurs excès de mortalité ont été observés chez les travailleurs des unités de fabrication. Dans cette étude, les facteurs de risques responsables de ces excès n'ont pas pu être identifiés par manque de données sur ces facteurs. Il est donc nécessaire de conduire des études analytiques complémentaires.

Le deuxième axe a consisté en l'analyse des associations entre la mortalité et l'exposition chronique aux rayonnements ionisants (interne et externe) dans une cohorte de 3 000 travailleurs du nucléaire potentiellement exposés à l'uranium (cohorte TRACY), en tenant compte d'autres facteurs de risques rarement documentés dans les cohortes de travailleurs du nucléaire. Un « effet du travailleur sain » a été observé. Une association positive a toutefois été observée entre l'exposition aux rayonnements ionisants et les cancers de la prostate, mais compte tenu des connaissances disponibles dans la littérature, cette association est peu susceptible d'être causale. Les résultats de cette étude doivent être considérés comme préliminaires et interprétés avec prudence.

Le dernier axe portera sur l'analyse de l'association entre dose interne et mortalité en développant une approche bayésienne pour tenir compte des incertitudes dans l'estimation de la dose et donc dans l'estimation du risque, résultant de mesures de surveillance enregistrées comme « inférieures au seuil ».

➤ **Mardi 20 mars**

**14 h 10 Salle Tournette**

## **SESSION PARALLÈLE**

### **Évaluation probabiliste des aléas externes**

**Présidente : Oona Scotti**

Esperta-séniore

Pôle Santé - Environnement

**Amine BEN DAOUED** - Démarche probabiliste pour la modélisation de l'aléa inondation avec prise en compte des incertitudes.

**Thomas CHARTIER** - Modélisation de la sismicité sur les failles pour le calcul probabiliste de l'aléa sismique.

**Sujet de la thèse :****Démarche probabiliste pour la modélisation de l'aléa inondation  
avec prise en compte des incertitudes**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Amine BEN DAOUED</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SCAN / BEHRIG</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Yasser HAMDJ</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Philippe SERGENT - CEREMA - Nassima MOUHOUS-VOYNEAU - UTC</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Technologie de Compiègne / UTC</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>UTC / IRSN</b>

---

Comme les zones côtières en France sont densément peuplées, les inondations maritimes représentent un risque naturel qui menace les populations et les installations dans plusieurs zones côtières. En effet, ces inondations maritimes semblent être multi-phénomènes et caractérisés par plusieurs variables explicatives (niveau marin, pluie, etc.). La modélisation conjointe de ces phénomènes est une question clé pour la communauté scientifique et s'inscrit dans le cadre de la thèse d'élaboration d'une démarche probabiliste de l'aléa inondation (PFHA). L'objectif principal des travaux de cette thèse est de mettre en place une méthodologie générale de prise en compte des phénomènes d'inondation conjointement.

Cette méthodologie repose sur trois principales étapes :

- i) probabilisation des phénomènes d'inondation,
- ii) propagation de ces phénomènes probabilisés de la source aux points d'intérêt sur le site,
- iii) agrégation des effets de ces phénomènes d'inondation et construction d'une courbe d'aléas.

Plusieurs idées et approches ont été proposées dans la littérature pour analyser et caractériser l'effet combiné du risque d'inondation marine avec les précipitations. Cependant, seules quelques études ont traité l'effet agrégé de ces phénomènes d'inondation. Les travaux menés dans la thèse soutiennent ces idées, reprennent certaines d'entre elles pour compléter certains aspects et propose une méthodologie générale impliquant un nouveau concept utilisant la dépendance et la coïncidence des phénomènes d'inondation. Cette méthodologie est appliquée sur la ville du Havre, une ville urbaine française sur la côte de la Manche.

**Sujet de la thèse :****Modélisation de la sismicité sur les failles pour le calcul probabiliste de l'aléa sismique**

---

Doctorant :	Thomas CHARTIER
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Tuteur de thèse :	Oona SCOTTI
Directeur de thèse :	Hélène LYON-CAEN – Ecole Normale Supérieure
Ecole doctorale :	IPGP-ENS / STEPUP ED560
Financement de thèse :	AXA Research Fund

---

L'approche la plus répandue pour calculer l'aléa sismique dans les régions où des failles ont été identifiées est de considérer ces failles composées de segments indépendants. De nombreux séismes récents mettent à mal cette hypothèse en exposant que des nombreuses failles voisines peuvent rompre lors d'un même séisme (exemple : Kaikoura NZ 2016, Italie centrale 2016). L'objectif de cette thèse est de développer une méthode qui admet des ruptures complexes dans les réseaux de failles tout en respectant la vitesse de glissement ( $V_g$ ) déduite par les géologues pour chaque faille individuelle. La méthode nécessite de formuler 2 types d'hypothèses : l'une concerne les possibles ruptures complexes, l'autre concerne la forme de la loi statistique qui contrôle le taux relatif des séismes par classe de magnitude ( $TsCm$ ). Avec ces 2 contraintes, la méthode permet de convertir, de manière itérative et par petits incréments de  $V_g$ , la  $V_g$  de chaque faille en  $TsCm$  jusqu'à l'épuisement du budget de  $V_g$  de chaque faille dans le système. Cette méthode a été appliquée sur le système de failles du rift de Corinthe, Grèce en temps que "*proof of concept*". La méthodologie a été ensuite implementée dans un nouveau code python nommé SHERIFS (*Seismic Hazard and Earthquake Rates In Fault Systems*) qui est en cours de validation. SHERIFS permet d'explorer différentes hypothèses de ruptures complexes au sein d'un arbre logique puis de les comparer aux données présentes sur la région afin de pondérer chaque hypothèse.

Actuellement la méthode est appliquée à la faille nord anatolienne à proximité d'Istanbul, Turquie. Une portion du système de la faille se trouvant en mer, sa mécanique est mal connue. Les données GPS, à terre, sont trop distantes et trop incertaines pour pouvoir discriminer entre un comportement de type fluage (pas d'accumulation de contrainte) ou bloqué (accumulation de contrainte) de la faille. Plusieurs hypothèses de  $V_g$  sont donc testées, les  $TsCm$  prédits sont ensuite comparés aux  $TsCm$  déduits de la sismicité enregistrée afin de départager les hypothèses. Lors de la présentation, l'impact de chaque hypothèse sur le risque sismique à Istanbul sera discuté.

Dans la suite de l'étude, les résultats de SHERIFS, basés sur une méthode purement statistique, seront comparés aux résultats obtenus grâce au code RSQsim qui permet de simuler la propagation de la rupture sismique de manière quasi-dynamique sur la base de lois de comportement empirique. Ceci permettra, entre autres, de vérifier le bien fondé des ruptures complexes postulées dans SHERIFS.





## ➤ Mardi 20 mars

14 h 10 Salle Spectacle

### SESSION PARALLÈLE

#### **Irradiation / pathologies**

**Présidente : Irène Sorokine**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Amélie FRÉNEAU** - Étude comparative des effets moléculaires et cellulaires induits par des rayonnements X de différentes énergies.

**Mariam BEN KACEM** - Utilisation de mesures d'Efficacité Biologique Relative moléculaires et fonctionnelles pour prédire le risque après radiothérapie - Application aux fortes doses par fraction et aux forts débits de dose.

**Frédéric SOYSOUVANH** - Sénescence endothéliale radio-induite et conséquences sur les lésions radiques aux tissus sains.

**Sujet de la thèse :****Étude comparative des effets moléculaires et cellulaires induits par des rayonnements X de différentes énergies**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Amélie FRÉNEAU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>07 / 09 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SERAMED / LRACC</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Gaëtan GRUEL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Laurence ROY - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Saclay / Structure et Dynamique des Structures du Vivant</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Lors d'un examen radiologique ou d'une radiothérapie, la dose délivrée aux organes du patient varie de quelques dixièmes à quelques dizaines de mGy. Ces faibles doses s'accumulent tout au long de la vie d'un individu, certains patients pouvant être soumis à plusieurs dizaines d'examen au cours d'une même année. Les risques liés à de telles expositions restent à identifier, à comprendre et à évaluer. En fonction du but de l'examen ou du traitement médical, le type de rayonnement utilisé n'est pas le même. Dans le cadre d'un examen radiologique (radiologie interventionnelle ou mammographie), un rayonnement X de basse énergie est utilisé ( $\leq 100$  keV). Lors d'une radiothérapie, l'énergie utilisée est de plusieurs MeV. Il est actuellement considéré que les photons quelle que soit leur énergie ont le même facteur de pondération des rayonnements ( $W_r$ ). Or, plusieurs études ont montré une augmentation de l'effet biologique relative des photons lorsque leur énergie diminue, et notamment une augmentation de la fréquence d'aberrations chromosomiques et une diminution de la survie clonogénique. En théorie, ces différences d'efficacité biologique pourraient avoir leur origine dans les différences topologiques, à l'échelle nanométrique, des dépôts d'énergie des rayons X en fonction de leur spectre énergétique. En effet, à mesure que l'énergie des photons décroît, la nature de leurs interactions avec la matière vivante se modifie.

Pour étudier cette différence, des cellules endothéliales primaires humaines ont été irradiées avec des rayons X à la dose de 5 Gy à des tensions de 40 kV et 4 MV. Dans un premier temps, l'étude comparative du devenir cellulaire après irradiation à ces deux tensions, a été réalisée par vidéo-microscopie et a permis de mettre en évidence, une diminution significative de la capacité des cellules à se diviser lors d'une irradiation à 40 kV. Cette diminution s'accompagne mécaniquement d'une diminution du nombre de catastrophes mitotiques observables à 40 kV. Afin d'apporter des éléments de réponses à cette différence, la signalisation des dommages de l'ADN et leur résolution, ont été étudiées quantitativement et qualitativement jusqu'à 72 heures après l'irradiation à l'aide de marquages par immunofluorescence. Ainsi, pour une même dose de rayons X, à 40 kV, le taux de dommages signalisés de l'ADN par noyau semble plus élevé qu'à 4 MV. La confirmation de ce résultat ainsi que l'étude de son lien avec l'activation des protéines clés de la régulation du cycle cellulaire post-irradiation, comme ATM, Chk2, P53 et P21, est en cours afin de mieux appréhender la différence de conséquence biologique observée entre les deux énergies étudiées.

**Sujet de la thèse :**

**Utilisation de mesures d'Efficacité Biologique Relative moléculaires et fonctionnelles pour prédire le risque après radiothérapie – Application aux fortes doses par fraction et aux forts débits de dose**

<b>Doctorant :</b>	<b>Mariam BEN KACEM</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SERAMED / LRMED</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Vincent PAGET</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Fabien MILLIAT - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>UPMC / ED394 Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La radiothérapie est utilisée pour traiter plus de la moitié des patients atteints de cancer. Malgré l'évolution des pratiques et techniques de radiothérapie qui permettent un meilleur ciblage de la tumeur, la toxicité aux tissus sains reste encore une limite en pratique clinique.

L'Efficacité Biologique Relative (EBR) est un concept d'iso-effet défini par le rapport de la dose d'un rayonnement de référence et de la dose d'un rayonnement étudié. Ce dernier est utilisé pour prédire les effets biologiques d'un rayonnement donné et par extrapolation le risque de complications aux tissus sains. Cette notion est essentiellement basée sur le test de survie clonogénique. Les courbes de survie sont modélisées par le « modèle linéaire quadratique » qui est insuffisant voir inadapté aux nouvelles pratiques en radiothérapie.

Ainsi, il est nécessaire de développer des mesures d'EBR multiparamétriques pour mieux prédire les effets biologiques d'une irradiation suivant les protocoles de radiothérapie émergents (fortes doses par fraction et forts débits de dose). Plusieurs études montrent l'implication des cellules endothéliales dans l'initiation et le développement des lésions radio-induites. Ainsi, deux types de cellules endothéliales humaines ont été irradiées à l'aide d'un accélérateur linéaire médical en faisant varier le débit de dose soit en dose unique, soit en dose fractionnée. Outre le test de clonogénicité, des mesures biologiques multiparamétriques *in vitro* ont été réalisées à des temps précoces (J3), intermédiaires (J7) et tardifs (J21).

Nous avons mis en évidence un effet du débit de dose sur la morphologie des cellules, la sénescence, la viabilité, le cycle cellulaire et l'expression génique (44 gènes impliqués dans la survie, la prolifération, le processus de sénescence et son sécrétome associé). Pour chacun de ces paramètres, la modélisation de la dynamique temporelle et sa dépendance à la dose et au débit est en cours. Les données concernant le fractionnement de la dose sont également en cours d'analyse. En collaboration avec des mathématiciens, la modélisation globale de l'information biologique sera initiée.

Afin de vérifier *in vivo* si une variation du débit de dose impacte les courbes de survie, nous réaliserons des irradiations corps entier de souris C57BL / 6J. Enfin, nous validerons *in vivo* dans un modèle préclinique la pertinence de la modélisation *via* deux approches, d'une part, une irradiation en dose unique de l'anse intestinale extériorisée (pour vérifier l'impact du débit de dose) et d'autre part, une irradiation pulmonaire en condition stéréotaxique (pour vérifier l'impact du fractionnement de la dose).

**Sujet de la thèse :**  
**Sénescence endothéliale radio-induite**  
**et conséquences sur les lésions radiques aux tissus sains**

Doctorant :	Frédéric SOYSOUVANH
Date du début de la thèse :	13 / 09 / 2015
Laboratoire :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Fabien MILLIAT
Directeur de thèse :	Fabien MILLIAT - IRSN
École doctorale :	UPMC / ED394 Physiologie, physiopathologie et thérapeutique
Financement de thèse :	IRSN

---

Parmi l'arsenal disponible dans le traitement des cancers, la radiothérapie s'impose comme un outil indispensable. La radiothérapie est une méthode de traitement locorégional des tumeurs qui utilise les rayonnements ionisants. Sa principale limite reste, aujourd'hui, les atteintes radio-induites aux tissus sains. Le Laboratoire de Radiobiologie des expositions Médicales (LRMed) a identifié l'endothélium vasculaire (monocouche de cellules tapissant les vaisseaux sanguins) comme acteur important dans l'initiation, la progression et le maintien des lésions radio-induites. Sous l'effet des rayonnements, les cellules endothéliales sont activées et acquièrent un phénotype sénescence. De ce fait, elles n'exercent plus leurs fonctions physiologiques. Ces phénomènes conduisent à la mise en place de la dysfonction endothéliale radio-induite.

La sénescence cellulaire correspond à la perte irréversible des capacités prolifératives des cellules. Définitivement arrêtées dans le cycle, les cellules sénescence restent viables et métaboliquement actives. Leur morphologie est altérée (hypertrophie) et surexpriment au niveau moléculaire des marqueurs, comme des inhibiteurs du cycle cellulaire (p16<sup>INK4A</sup> et p21) et la  $\beta$ -galactosidase. Enfin, elles adoptent un phénotype immunogène qui consiste en l'expression exacerbée de marqueurs antigéniques et la mise en place d'un sécrétome pro-inflammatoire spécifique.

L'objectif de ce travail de thèse est d'établir le rôle de la sénescence endothéliale dans l'évolution des lésions radio-induites au niveau des tissus sains.

Par analyse comparative *in vitro*, après irradiation à fortes doses, de 6 lignées endothéliales humaines, nous avons identifié la lignée HUVEC (*Human Umbilical Vein Endothelial Cells*) comme la plus pertinente pour notre étude. Nous avons caractérisé d'un point de vue phénotypique les HUVECs sénescence. Puis, à l'aide du profil moléculaire dynamique de cette lignée (8 pas de temps, 9 doses), nous avons identifié SP1 et SIRT1 comme cibles importantes dans la mise en place de la sénescence endothéliale radio-induite. En altérant l'expression de ces 2 facteurs nous cherchons à déterminer leur impact dans l'acquisition du phénotype sénescence.

Par étude *in vivo*, utilisant des modèles murins génétiquement modifiés, nous désirons identifier l'implication de la sénescence dans l'apparition des lésions pulmonaires après irradiation. Pour cela nous disposons au laboratoire d'un modèle de souris « *knockin* » permettant de suivre les cellules sénescence par bioluminescence via le marqueur d'un inhibiteur du cycle cellulaire p16<sup>INK4A</sup> (souris p16<sup>INK4A</sup> / Luciférase). En parallèle, à l'aide d'animaux « *knockout* » invalidés pour PAI-1 (inhibiteur des activateurs du plasminogène de type 1, marqueur de sénescence) spécifiquement dans l'endothélium, nous voulons déterminer le rôle de cette protéine dans un modèle préclinique de lésions radio-induites pulmonaires.

➤ **Mardi 20 mars**

15 h 15 Salle Tournette

## SESSION PARALLÈLE

### **Mécanique / endommagement**

**Président : Gauzelin Barbier**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG**

Modélisation micromécanique de l'endommagement ductile par une approche cohésive-volumique : application à l' $UO_2$  irradié.

**Paul EYMÉOUD** - Modélisation atomistique de la fragilisation des gaines combustibles nucléaires par les hydrures.

**Louis JOËSSEL** - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal poreux : application à un acier inoxydable austénitique irradié.

## Sujet de la thèse :

**Modélisation micromécanique de l'endommagement ductile  
par une approche cohésive-volumique : application à l'UO<sub>2</sub> irradié**

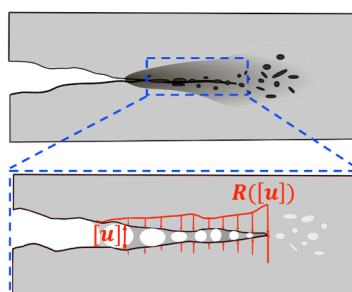
Doctorant :	Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Yann MONERIE - LMGC
École doctorale :	Université de Montpellier / ED 166 Information Structures Systèmes
Financement de thèse :	IRSN - EDF

Le dioxyde d'uranium UO<sub>2</sub>, utilisé comme combustible nucléaire, est une céramique poreuse dont le comportement est fragile à basse température et ductile à haute température avec une température de transition d'environ 1200 °C. En situation accidentelle postulée de type accident d'insertion de réactivité (*Reactivity Initiated Accident* (RIA), des températures élevées (supérieures à la température de transition) couplées aux différents chargements mécaniques conséquents peuvent conduire à la sur-fragmentation des pastilles de combustible. Une bonne prédiction de cet endommagement est nécessaire, notamment pour caractériser avec précision les contraintes thermomécaniques subies par la gaine, première barrière de sûreté lors d'un RIA.

Ce travail de thèse se propose de contribuer à la modélisation et à la simulation numérique de l'endommagement ductile à haute porosité et de la fissuration du combustible UO<sub>2</sub> irradié. L'objectif appliqué est d'investiguer finement l'interaction mécanique entre le combustible et la gaine et de mettre en évidence les mécanismes de fissuration du combustible lors d'un transitoire de type RIA, notamment dans la zone périphérique du combustible fortement restructurée sous l'effet de l'irradiation et communément appelée zone HBS (*High Burn-up Structure*).

La démarche globale de modélisation et de simulation adoptée repose sur une approche cohésive-volumique, dont le principe de base consiste à coupler des lois matériaux thermo-élasto-plastiques décrivant le comportement volumique du matériau, à des modèles de zones cohésives qui permettent de décrire le processus d'endommagement et de rupture du matériau. Dans ce cadre, un nouveau modèle analytique de zone cohésive a été développé sur des bases micromécaniques. Ce modèle résulte d'une synthèse du modèle d'endommagement ductile volumique de Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) sous une formulation cohésive.

L'implémentation numérique de ce modèle est en cours dans le logiciel Xper (code de calcul dédié à la simulation de la fragmentation dynamique des milieux hétérogènes). La validation de la pertinence de ce nouveau modèle de zone cohésive et de son implémentation sera conduite par comparaison à des données expérimentales et numériques de la littérature.



$$R = R([u])$$

$R$  : Efforts de cohésion

$[u]$  : Ouverture en pointe de fissure

## Sujet de la thèse :

## Modélisation atomistique de la fragilisation des gainages combustibles nucléaires par les hydrures

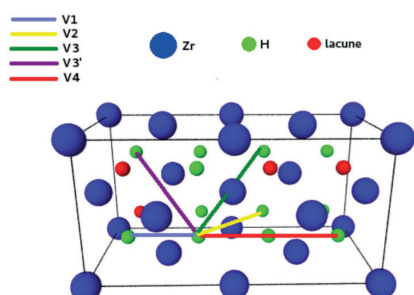
Doctorant :	Paul EYMÉOUD
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Fabienne RIBEIRO
Directeur de thèse :	Guy TRÉGLIA - CNRS
École doctorale :	Aix-Marseille Université / Physique et sciences de la matière ED 352
Financement de thèse :	IRSN

La gaine des crayons de combustible des réacteurs à eau pressurisée, constituée d'alliage de zirconium (Zr), s'oxyde lors de sa vie en réacteur. L'hydrogène (H) libéré lors de cette oxydation des gaines diffuse dans le métal et génère des précipités d'hydrures de zirconium (Zr-H). Ceux-ci fragilisent le matériau par abaissement de la ductilité et de la limite à rupture, et peuvent être le lieu d'amorçage de fissures. Cela constitue un enjeu de sûreté nucléaire, car l'intégrité de la gaine, première barrière de sûreté, doit être maintenue durant l'ensemble du cycle de vie du crayon combustible : fonctionnement en réacteur, transport et entreposage.

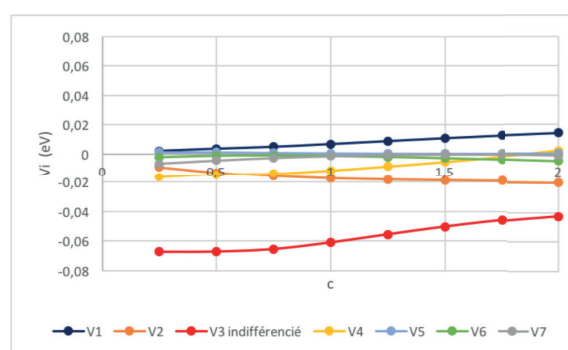
L'objectif de la thèse est d'analyser les mécanismes régissant la précipitation et la dissolution des hydrures de zirconium en modélisant le diagramme de phase Zr-H hors puis sous contrainte (distortions du réseau), par des approches thermostatistiques. Pour cela un modèle énergétique atomistique présentant un bon compromis entre précision et coût numérique est nécessaire : la construction d'un tel modèle a fait l'objet des deux premières années de thèse.

Pour caractériser l'ordre chimique des hydrures de zirconium cubique face centrée (cfc), nous avons développé un modèle d'Ising effectif, qui décrit l'énergie du système en tant que somme d'interactions de paires H-H. Ces dernières ont été dérivées par calcul perturbatif sur un état désordonné, à partir d'un Hamiltonien de liaisons fortes. La démarche a révélé une prépondérance des interactions de paires aux troisièmes voisins H-H (cf. Figure).

Le modèle d'Ising obtenu a ensuite été validé en comparant les énergies de structures ordonnées obtenues d'une part, à partir de notre modèle, et calculées directement d'autre part, en liaisons fortes (diagonalisation, fraction continue) et en DFT (théorie de la fonctionnelle de la densité, méthode de calcul quantique) en collaboration avec l'UMET Lille 1. Ce modèle est à présent apte à l'exploration thermostatistique du diagramme de phase Zr-H.



Voisinsages H-H au sein d'une structure de Zr-H



et valeurs numériques des potentiels de paire H-H obtenues par calcul perturbatif



## Sujet de la thèse :

**Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal poreux :  
application à un acier inoxydable austénitique irradié**

Doctorant :	Louis JOËSSEL
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Mihai GARAJEU (Université d'Aix Marseille )
Codirecteur de thèse :	Martin IDIART (Université nationale de La Plata, Argentine)
École doctorale :	Aix-Marseille Université-ED 353
Financement de thèse :	IRSN

Le contexte de ce travail est relatif au vieillissement des internes de cuve dans les réacteurs à eau sous pression. Les internes de cuve, principalement en acier inoxydable austénitique, sont soumis à une irradiation élevée durant leur utilisation en réacteur. Ceci peut potentiellement entraîner dans le temps l'apparition de cavités dans ce type d'acier.

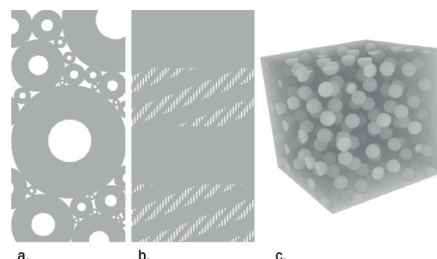
Ainsi, à l'échelle microscopique, ces aciers irradiés présentent une structure polycristalline poreuse avec des cavités intragranulaires. L'objectif de ce travail de thèse est de modéliser le comportement viscoplastique d'un polycristal poreux. Il est prévu d'appliquer les outils développés au cours de la thèse aux aciers inoxydables austénitiques irradiés.

À cette échelle, la taille des cavités dans ces aciers irradiés étant petite devant celle du cristal environnant et la taille des cristaux étant petite devant celle de la taille caractéristique du polycristal, le comportement macroscopique d'un polycristal poreux peut être caractérisé par une démarche en deux étapes. Tout d'abord, le comportement macroscopique d'un monocristal poreux est modélisé, pour ensuite passer à l'échelle polycristalline.

Trois approches ont été développées en deuxième année de thèse pour décrire le comportement viscoplastique d'un monocristal poreux à symétrie cubique :

- La première approche consiste à idéaliser le monocristal poreux comme un assemblage d'une infinité de sphères creuses et conduit à une borne du comportement macroscopique.
- La seconde approche consiste à idéaliser le monocristal poreux comme un laminé de rang infini. Bien qu'irréalistes, les laminés de rang infini permettent de reproduire le comportement d'une large gamme de biphasés. L'étude de ce type de microstructure permet d'obtenir une estimation exacte mimant le comportement macroscopique d'un monocristal poreux.
- La troisième approche consiste à idéaliser le monocristal poreux comme une microstructure périodique pour estimer le comportement effectif *via* des simulations numériques en champ complet par une méthode basée sur la transformée de Fourier rapide (méthode FFT). Cette méthode exploite directement des images de microstructures et est particulièrement adaptée à l'étude de matériaux aux comportements fortement non linéaires. Les résultats des simulations numériques servent de référence aux deux autres approches.

En perspective, il est prévu de proposer un modèle pour un polycristal poreux en exploitant les résultats des approches développées ci-dessus. Le modèle final sera comparé à un modèle implémenté en première année de thèse spécialement dédié aux aciers inoxydables austénitiques irradiés. Il pourra par la suite être implémenté dans des codes de calcul industriels.



a. Assemblage de sphères creuses homothétiques  
b. Laminé séquencé de rang 3  
c. Microstructure périodique.

➤ **Mardi 20 mars**

15h 15 Salle Spectacle

## SESSION PARALLÈLE

### **Doses / effets**

**Président : Flavien Lemoine**

Responsable Cellule pour l'Optimisation et la Valorisation des plateaux  
Pôle Santé - Environnement

**Julie COLNOT** - Risque de complications associées à la radiothérapie externe : étude comparative des doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie externe.

**Nicolas TANG** - Évaluation, à partir de modélisations nanodosimétriques, de l'influence de la compaction de la chromatine sur les effets radioinduits précoces et extension aux effets tardifs (dysfonctionnements et mort cellulaire).

**Sujet de la thèse :****Risque de complications associées à la radiothérapie externe :  
étude comparative des doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées  
de radiothérapie externe**

<b>Doctorant :</b>	<b>Julie COLNOT</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SDOS / LDRI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christelle HUET</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christelle HUET (IRSN) et Régine GSCHWIND (Université de Bourgogne-Franche-Comté)</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris XI / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Les techniques avancées de radiothérapie externe permettent une meilleure conformation au volume cible en utilisant de multiples faisceaux de petites dimensions, une modulation d'intensité et l'imagerie simultanée. Cette précision supérieure se fait au prix de l'exposition d'un plus grand volume de tissus sains à une dose avec pour conséquence d'éventuelles complications radio-induites. L'évaluation du risque encouru nécessite alors une connaissance aussi précise que possible de la dose délivrée aux tissus sains.

L'objectif de la thèse est de déterminer avec précision les doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie externe. Le travail s'effectue en deux parties, la première partie a pour but d'évaluer les doses aux tissus sains par simulation Monte-Carlo. Cette partie, centrée sur l'évaluation des doses lors d'un traitement pulmonaire au CyberKnife, est réalisée en collaboration avec le Centre François Baclesse de Caen. La deuxième partie du travail de thèse consiste en une comparaison expérimentale des doses délivrées aux tissus sains pour différentes techniques avancées de radiothérapie. Cette étude (en collaboration avec l'Institut Curie) porte sur les traitements pédiatriques de tumeurs abdominales par tomothérapie et RapidArc. Finalement, les doses aux tissus sains délivrées par les techniques avancées (tomothérapie, RapidArc) et le CyberKnife seront également comparées pour un traitement pulmonaire adulte.

Le développement des outils nécessaires à l'évaluation des doses aux tissus sains est en cours. En ce qui concerne la simulation, la dernière version du code MC PENELOPE et de son interface a été implémentée. La géométrie de la tête de l'accélérateur Cyberknife déjà existante a été complétée avec des éléments de blindage issus des plans constructeur afin de mieux reproduire les valeurs des doses loin de l'isocentre et les profils de dose simulés ont été comparés aux données mesurées avec une diode et des films radiochromiques. La suite du travail se concentre sur la validation complète du modèle numérique ainsi que sur l'implémentation de fantômes voxelisés, basés sur des images scanner, dans la simulation MC.

Les outils expérimentaux sont basés sur l'utilisation de films radiochromiques et de gels dosimétriques. Les gels dosimétriques, confectionnés au laboratoire, ont donné des résultats prometteurs en termes de sensibilité, de linéarité de réponse et d'uniformité du lot. Les mesures en cours ont pour but de mettre au point un protocole robuste d'utilisation de ces dosimètres. Enfin un outil de reconstruction 3D de la dose obtenue en 2D avec les films est en cours de développement.

**Sujet de la thèse :**

**Évaluation, à partir de modélisations nanodosimétriques,  
de l'influence de la compaction de la chromatine sur les effets radioinduits précoces  
et extension aux effets tardifs (dysfonctionnements et mort cellulaire)**

<b>Doctorant :</b>	<b>Nicolas TANG</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SDOS / LDRI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Carmen VILLAGRASA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Sébastien INCERTI, IN2P3 – CENBG</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Bordeaux – Sciences Physiques et de l'Ingénieur – ED 209</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

La thèse s'inscrit dans l'axe 1 du programme de recherche interne ROSIRIS qui a pour objectif d'améliorer les connaissances biologiques sur les complications des radiothérapies. Cet axe vise à décrire le mécanisme reliant la topologie des premiers dépôts d'énergie dans la cellule avec les premiers effets radioinduits responsables d'effets délétères comme sont les dommages à l'ADN. Il est reconnu que ces dommages peuvent conduire à des aberrations chromosomiques, la mort cellulaire ou au développement d'un cancer. Egalement, les niveaux de condensation de la chromatine semblent jouer un rôle quant au nombre de dommages radioinduits à l'ADN.

Partant de cela, cette thèse a pour premier objectif d'étudier, en utilisant la simulation Monte Carlo, l'influence des deux niveaux de compaction de la chromatine qui sont l'hétérochromatine (condensée) et l'euchromatine (décondensée) sur les dommages biologiques. Il est nécessaire de calculer les cassures double brins (CDB) à l'ADN dans un modèle géométrique réaliste comprenant cette compaction. Un modèle d'hétérochromatine a été conçu précédemment au laboratoire et sa coexistence avec un nouveau modèle d'euchromatine doit être implémentée. Cette géométrie de l'ADN est générée grâce à un logiciel développé au sein du laboratoire : DnaFabric. Des données expérimentales concernant la répartition de la chromatine proviennent du LRAcc de l'IRSN. Ainsi, des noyaux cellulaires plus réalistes comprenant une répartition des zones d'hétérochromatine et d'euchromatine sont générés et exportés vers une chaîne de calcul basée sur le code Monte Carlo Geant4-DNA pour effectuer les simulations permettant le calcul des CDB.

Premièrement, une simulation du nombre de dommages à l'ADN après irradiation en fonction de trois types de noyaux cellulaires ne comprenant que le modèle d'hétérochromatine a été effectuée. Néanmoins, des modifications concernant l'étape chimique ont été effectuées afin de l'améliorer (plus de réactions).

Il a été montré que le nombre de dommages était influencé par le volume nucléaire ainsi que par la densité d'ADN à l'échelle microscopique.

Actuellement, un modèle d'euchromatine a été implémenté. Ainsi, ces mêmes noyaux ont été de nouveau générés mais prenant en compte cette fois-ci la répartition des deux compactions de la chromatine et pour deux configurations: mélange homogène ou zones différenciées hétérochromatine / euchromatine. Les premiers résultats montrent une augmentation du nombre de dommages lorsque les deux types de compaction de la chromatine sont considérés par rapport à l'hétérochromatine seulement.

Un papier concernant les dommages à l'ADN sur les trois noyaux cellulaires remplis d'hétérochromatine a été soumis au journal « *Radiation Protection Dosimetry* ».



## ➤ Mardi 20 mars

16 h 45 Salle Tournette

### SESSION PARALLÈLE

#### **Modélisation corium**

**Président : Jean-Michel Bonnet**

Adjoint au Directeur

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Kasi Visweswara Siva Sai GAJAVALLI** - Description thermodynamique des phases dans le quaternaire Ag-In-Cd-Zr à haute température.

**Shambhavi NANDAN** - Modélisation d'évolutions de configurations du corium en fond de cuve en cas d'accident grave dans un réacteur nucléaire.

**Alejandro VILLARREAL LARRAURI** - Modélisation et analyse des processus de refroidissement sous eau des bains de corium en interaction avec le béton.

## Sujet de la thèse :

Description thermodynamique des phases dans le quaternaire Ag-In-Cd-Zr  
à haute température

Doctorant :	Kasi Visweswara Siva Sai GAJAVALLI
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN & Pierre BENIGNI
Directeur de thèse :	Jacques ROGEZ – CNRS – Marseille
École doctorale :	Aix Marseille University / Physique et sciences de la matière ED352
Financement de thèse :	IRSN

The 80 wt.% Ag, 15 wt.% In, 5 wt.% Cd alloy is used as absorber material in PWR reactors. During a severe accident, the absorber rod failure early occurs. At 1200°C, Cd vapour and helium initially present in the rod cause internal pressurization leading to rupture of the absorber rod cladding. Ag-In-Cd vapours then released into the core may interact with iodine and may significantly affect its speciation and its transport in the reactor coolant system and in the containment. The thermodynamic study of the Ag-In-Cd liquid phase as well as the interaction of this phase with zirconium from the absorber rod guide tube is a necessary step for a reliable estimate of the vaporization of the chemical elements of the absorber material. In a previous work, the Ag-Zr and Ag-Cd-In phase diagrams were studied [1,2].

To complete the previous study on the Ag-Cd-In phase diagram in particular in the Cd-rich region, differential thermal analysis has been performed for various compositions to determine their liquidus temperature. In this framework, a new experimental protocol consisting in temperature cycling near liquidus was applied. This protocol validated on Ag-In binary compositions whose liquidus points were well established was extended to 9 ternary compositions. It highlighted that this approach allows reducing the uncertainty on the liquidus determination in comparison with the classical protocol at constant heating and cooling rates [3]. The obtained liquidus data, the calorimetric measurements of the mixing enthalpy of liquid phase [4] and the already published experimental information are included in a CALPHAD optimization (consisting in a self-consistent fit of the Gibbs energies of the different phases) to propose for the first time a thermodynamic modelling of the Ag-Cd-In ternary system.

With regard to the extension of the Ag-Cd-In system to zirconium, the In-Zr diagram in which several stoichiometric compounds were identified has been the focus of the recent work due to the limited existing data. Samples of 66% at. In 33% at. Zr were prepared by mixing powders of pure elements, taking care that homogeneous mixture was reached. Several direct calorimetry experiments at high temperature have been performed to measure the enthalpy of formation of the  $\text{In}_2\text{Zr}$  compound. Dissolution calorimetry experiments are foreseen to measure by a different way the standard enthalpy of formation of the In-Zr stoichiometric compounds. Dissolution tests of In and Zr in liquid aluminum baths at 723°C and 900°C [5] have been performed and will be discussed.

These experimental data will be capitalized in the thermodynamic NUCLEA database developed by IRSN for severe accident analysis. In the future, these thermodynamic studies should be extended to the impact of oxygen and iron on the Ag-Cd-In-Zr system.

- [1] A. Decreton, "Contribution expérimentale à l'étude thermodynamique des systèmes Ag-Zr et Ag-Cd-In," *PhD Thesis*, Aix Marseille University, 2016.
- [2] A. Decreton, P. Benigni, J. Rogez, G. Mikaelian, M. Barrachin, M. Lomello-Tafin, C. Antion, C. and A. Janghorban, E. Fischer, "Contribution to the description of the absorber rod behavior in severe accident conditions: An experimental investigation of the Ag-Zr phase diagram", *Journal of Nuclear Materials*, 465 (2015) 849-856
- [3] Gajavalli, K., Mikaelian, G., Barrachin, M., Decreton, A., Fischer, E., Rogez, J., Benigni, P., " Interrupted Heating DTA for Liquidus Temperature Determination of Ag-Cd-In Alloys" *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2018 - Submitted
- [4] Benigni, P., Hassam, S., Decreton, A., Mikaelian, G., Gajavalli, K., Barrachin, M., Fischer, E., Rogez, J., "Enthalpy of mixing in the Ag-Cd-In ternary liquid phase," *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 107, pp. 207-215, 2017.
- [5] Barrachin, M., Gajavalli, K., Decreton, A., Virof, F., Benigni, P., Rogez, J., Mikaelian, G., Lomello-Taffin, M., Antion, C., Janghorban, A., "Critical Evaluation of Experimental Data of Solution Enthalpy of Zirconium in Liquid Aluminum" *Journal of Chemical Thermodynamics* 2018 - Submitted

## Sujet de la thèse :

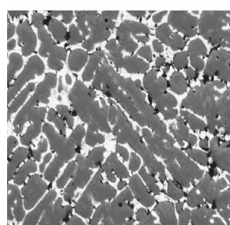
Modelling of the evolution of corium in the reactor vessel lower head  
in case of hypothetical severe accident

Doctorant:	Shambhavi NANDAN
Début de thèse :	04 / 01 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Responsable de thèse :	Florian FICHOT
Directeurs de thèse :	Hervé COMBEAU – Mines de Nancy et Lounès TADRIST - IUSTI
École doctorale :	Univ. Aix-Marseille / Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nano-électronique
Financement de thèse:	Programme européen H2020

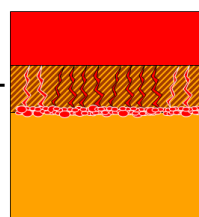
The general context of the thesis concerns the improvement of the models used to evaluate the efficiency of corium (molten metal and nuclear fuel) retention by external cooling in a nuclear reactor in case of hypothetical severe accident. This approach of improving models and proposing an updated methodology among many European partners is the topic of the European In-Vessel Melt Retention (IVMR) project (framework H2020) led by IRSN. More precisely, this thesis deals with the interpretation of the CORDEB experiment carried out at NITI (Russia) for IRSN and French partners EDF, CEA and AREVA. The CORDEB program is performed with prototypic materials ( $UO_2$ , Zr and steel) and has been defined to specifically study transient changes in the corium pool and debris configurations as they are likely to occur in the case of severe accident. These transient changes have a significant impact on the progression and the stratification between oxides and metals in the molten pool and thus on the thermal loadings (heat flux) to the reactor vessel. After massive relocation of corium to the bottom of the vessel, the most probable configuration is that of an oxide pool covered by a layer of metal (mainly steel), the two layers being separated by a thin crust. CORDEB tests have shown that this crust significantly slows down the mass transfer between the oxide phase and the metal phase, which has consequences on the thickness of the metal layer and therefore on the heat transfer to the reactor vessel (focusing effect). Thus the main subject of the thesis consists of modeling the transfer of the metal through a crust originally made of a sub-stoichiometric oxide (U, Zr) O.

In the very beginning of first year of the thesis, the volume averaged form of transport equations has been developed for the quaternary system of species (U-Zr-O-Fe), dispersed across the two phase (solid-oxide and liquid-metal phase) crust. Considering the strong couplings of partial differential equations of the derived system, some simplifications have been attempted to reduce the number of equations. One important simplification proposed is the reduction of the quaternary system of species as two binary systems (one in each phase). This simplification appears justified by the results obtained from a thermochemical study using NUCLEA (an in-house thermochemical database). Another outcome of that study is a simplified thermochemical model to calculate the equilibrium concentrations of the species (appearing in the set of differential equations), without using a Gibbs energy minimization solver at each time step while solving the equations iteratively. This simplified model can simply be seen as a fit to the data of a Gibbs energy solver. In parallel, new results from CORDEB experiment have also been analyzed by carrying out various thermochemical studies using NUCLEA. This confirmed the validity of NUCLEA database in the range of compositions corresponding to most of the existing nuclear power reactors (including PWR, BWR and PHWR).

Future work will include the search for an optimal method of resolution of the set of equations already derived. In a first step, it has been planned to solve for diffusion in each phase, neglecting any dispersion and convection. Some initial studies are underway using an ordinary differential equation



Oxygen content: 61.5 at%



Métal  
Croûte oxyde  
mushy zone  
Bain oxyde

model. Later the effects of convection and dispersion will also be taken into account to get larger picture of the convection-diffusion phenomena occurring in the crust. Validation of the results with CORDEB experiment will also be performed.

*Left: picture of a sample of the crust (CORDEB)  
Right: schematic representation of the mass transfer process across the crust*



## Sujet de la thèse :

Modélisation et analyse des processus de refroidissement sous eau  
des bains de corium en interaction avec le béton

Doctorant :	Alejandro VILLARREAL LARRAURI
Date du début de la thèse :	23 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Tuteur de thèse :	Renaud MEIGNEN
Directeur de thèse :	Michel GRADEK – LMTA Université de Lorraine
École doctorale :	Université de Lorraine / Energie, Mécanique, MATériaux
Financement de thèse :	IRSN

La perte prolongée du refroidissement d'un réacteur nucléaire peut conduire, à cause de la puissance résiduelle, à la fusion du combustible et des matériaux de structure en un magma appelé corium ( $T > 2500$  K), qui progresse dans l'installation jusqu'à l'interaction avec le béton du radier. L'injection d'eau par le haut pour refroidir le corium et le stabiliser est un moyen envisagé pour limiter la progression d'un accident grave. L'objectif de la thèse est d'améliorer la compréhension et la modélisation de la phénoménologie du refroidissement du corium par l'eau.

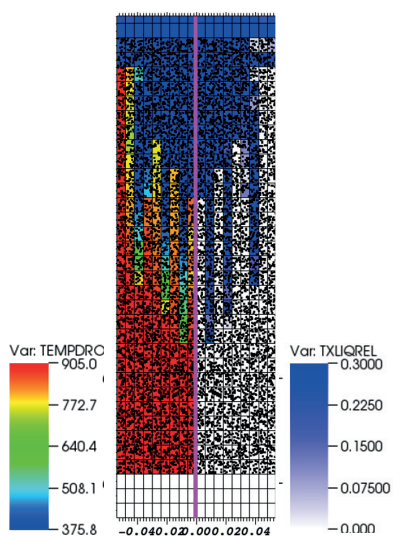
Deux mécanismes majeurs du refroidissement à analyser sont l'infiltration d'eau dans la croûte se formant au dessus du bain de corium, et l'éjection de corium à travers cette croûte pour former un lit de débris supposé refroidissable.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'*Argonne National Laboratory* (ANL, USA) et EDF, l'essai CCI-9 a été réalisé avec un corium prototypique dans l'objectif d'analyser plus particulièrement le phénomène d'infiltration d'eau (*water ingress*). Notre analyse des résultats de l'essai conduit à confirmer l'importance de ce mécanisme pour le refroidissement du bain de corium.

L'essai CCI-8 avait quant à lui montré que, pour certains types de béton, le phénomène d'éjection est prépondérant. Le second objectif de la thèse est de vérifier la refroidissabilité des lits de débris générés par ce mécanisme en condition représentative d'un accident. Nous utilisons le logiciel de thermohydraulique multiphasique MC3D, développé par l'IRSN, déjà validé pour les situations d'injection d'eau par le bas (essais PEARL de l'IRSN). La configuration d'injection d'eau par le haut est plus complexe et est très peu documenté dans la littérature.

Malgré une certaine variabilité des résultats, le logiciel permet de retrouver qualitativement le comportement du refroidissement en canaux (figure) mis en évidence par les expériences de Ginsberg (1983), réalisés sans puissance résiduelle. Un modèle analytique est en cours d'élaboration, ainsi que des calculs applicatifs prenant en compte la puissance résiduelle.

Par la suite, la thèse s'orientera dans un premier temps vers la prise en compte de la puissance résiduelle émise dans le bain et la croûte, via la recherche d'une modélisation du phénomène d'infiltration d'eau dans cette croûte.



Simulation du refroidissement d'un lit de débris avec MC3D  
Gauche : température des débris  
Droite : taux de liquide (en miroir)

➤ **Mardi 20 mars**

**16 h 45 Salle Spectacle**

## **SESSION PARALLÈLE**

### **Transfert grande échelle**

**Président : Marc Babut**

Institut national de recherche en sciences et technologies  
pour l'environnement et l'agriculture  
Membre du Comité de visite de l'IRSN

**Thomas FERRACCI** - Modélisation de la charge en suspension  
des cours d'eau pour l'évaluation des flux de radionucléides.

**Pierre-Emmanuel OMS** - Transferts multi-échelles des apports  
continentaux sur le plateau du golfe de Gascogne.

**Ngoc Bao Tran LE** - Quantification d'incertitude par réduction  
de modèle de dispersion atmosphérique.

**Sujet de la thèse :****Modélisation de la charge en suspension des cours d'eau pour l'évaluation des flux de radionucléides**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Thomas FERRACCI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LRTA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Patrick BOYER</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Fabien ANSELMET –École Centrale Marseille</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Aix-Marseille Université / ED 251 - Sciences de l'Environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN-Région PACA</b>

---

La gestion de la qualité radiologique des cours d'eau implique d'évaluer les flux solides et les pollutions radioactives qui leurs sont associées. Les radionucléides émis par l'industrie nucléaire dans les cours d'eau se trouvent sous deux formes principales : une forme dissoute dans l'eau (colonne d'eau ou eau interstitielle du sédiment) et une forme particulaire dans laquelle ils sont adsorbés à la surface des particules solides. Ainsi, la concentration totale des radionucléides est la somme de ces deux formes dont le fractionnement conditionne les temps de transferts, les échanges entre le sédiment et la colonne d'eau et la biodisponibilité des radionucléides. L'évaluation de la concentration massique des radionucléides sur les particules peut couvrir une incertitude de plusieurs ordres de grandeur en raison de la forte variabilité du fractionnement liquide-solide en fonction des couples radionucléides-particules et des conditions physico-chimiques. L'un des principaux facteurs de cette variabilité est la granulométrie des particules du fait de la forte dépendance de leur capacité d'adsorption à leur surface spécifique : plus les particules sont fines, plus leur surface spécifique est importante et plus elles sont susceptibles d'adsorber les radionucléides. Alors que la charge en suspension des particules transportées par les rivières est plus ou moins bien évaluée par des lois empiriques de type charge-débit, il n'existe pas de méthode pour prévoir leur granulométrie. Le but de cette thèse est de proposer une approche pour évaluer cette granulométrie à partir des relations charge-débit et des caractéristiques des cours d'eau.

Pour cela, nous avons développé un modèle qui couple une approche dite à résistance, appliquée initialement aux aérosols, et le profil de Rouse qui représente les transferts verticaux des particules dans la couche turbulente d'un écoulement. Ce modèle intègre les processus d'érosion et de sédimentation, la diffusion moléculaire au sein de la sous-couche visqueuse à l'interface du sédiment et de la colonne d'eau, et les diffusions moléculaires et turbulentes dans l'écoulement. L'approche est testée sur un dispositif expérimental constitué d'une cuve d'eau agitée de façon à produire des gradients verticaux contrôlés de turbulence, de concentrations et de granulométrie des particules. Elle est également confrontée aux données charge-granulométrie-débit fournies par la Station Observatoire des Sédiments du Rhône (SORA) de l'IRSN située à Arles.

## Sujet de la thèse :

## Transferts multi-échelles des apports continentaux sur le plateau du golfe de Gascogne

Doctorant :	Pierre-Emmanuel OMS
Date du début de la thèse :	15 / 09 / 2015
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Tuteur de thèse :	Pascal BAILLY DU BOIS - IRSN / Franck DUMAS - SHOM / Pascal LAZURE - IFREMER
Directeur de thèse :	Pascal BAILLY DU BOIS – IRSN / Pascal LAZURE - IFREMER
École doctorale :	Université Bretagne Loire
	École Doctorale des Sciences de la Mer et du Littoral
Financement de thèse :	IRSN – IFREMER

La connaissance du devenir des radionucléides rejetés de manière contrôlée ou accidentelle dans l'environnement est un axe essentiel de la maîtrise du risque nucléaire.

Les objectifs de cette thèse sont de mesurer et modéliser le transport par les fleuves et la dispersion dans le golfe de Gascogne d'un radionucléide traceur de la masse d'eau : le tritium sous la forme HTO. La principale source de tritium dans le golfe de Gascogne provient des rejets chroniques des centrales nucléaires dans la Loire et dans la Gironde.

Dans un premier temps, un important effort d'échantillonnage a été réalisé au printemps 2016 dans l'ensemble du Golfe de Gascogne. Près de 200 mesures à très bas niveau en tritium (HTO) ont été acquises. En parallèle, des systèmes de prélèvement automatique d'eau ont été élaborés et installés en aval des centrales nucléaires de la Loire et de la Gironde afin de mesurer quotidiennement de façon intégrée les flux de tritium arrivant dans le golfe de Gascogne.

Dans un second temps, le transport par les rivières du tritium issu des centrales jusqu'à l'océan a été modélisé avec le modèle CASTEAUR (IRSN). Ces flux de tritium ont été introduits dans le modèle hydrodynamique MARS3D (IFREMER) qui a simulé la dispersion du tritium dans le golfe de Gascogne en conditions réelles entre 2007 et 2016.

La mesure conjointe des traceurs salinité et tritium permet, grâce à des signatures différentes entre la Loire et la Gironde, de différencier les contributions relatives de ces apports fluviaux à l'échelle du golfe de Gascogne. Une première estimation du temps de résidence du tritium sur le plateau du golfe de Gascogne a été calculée à l'aide des stocks en tritium mesurés. Tous ces résultats ont été comparés aux simulations. Ils sont encourageants et donnent

une bonne évaluation de la représentativité du modèle (cf. figure 1).

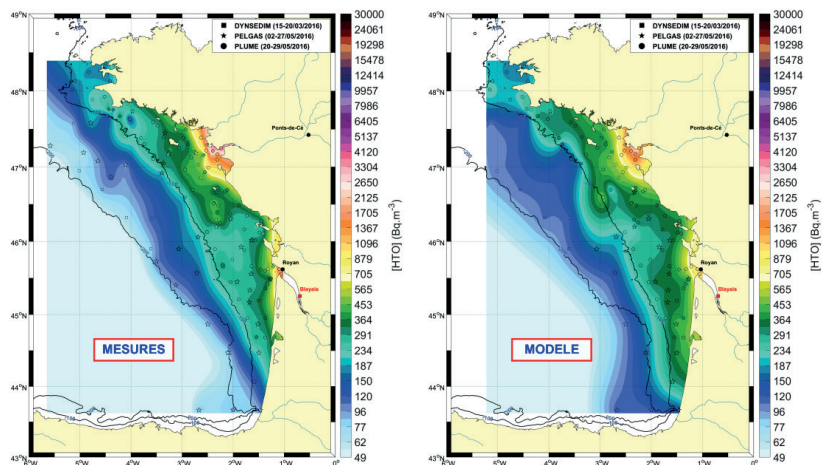


Figure 1 : Concentrations de tritium (HTO) en surface (0-10 m) mesurées (à gauche) et simulées (à droite).

**Sujet de la thèse :****Quantification d'incertitude par réduction de modèle de dispersion atmosphérique**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Ngoc Bao Tran LE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SESUC / BMCA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Irène KORSAKISSOK, Anne MATHIEU</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Vivien MALLET - INRIA Paris</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>ED 386 - Université Pierre et Marie Curie</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

En cas de crise nucléaire conduisant à un rejet de radionucléides dans l'environnement, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) modélise le devenir des radionucléides dans l'environnement en support à la décision pour la gestion de la crise. L'évaluation des conséquences d'un rejet accidentel dans l'atmosphère repose sur la simulation de la dispersion atmosphérique des radionucléides. La modélisation de la dispersion atmosphérique est entachée de fortes incertitudes dues à la connaissance très approximative du terme source, aux incertitudes des conditions météorologiques, aux approximations de la modélisation des processus de transport des radionucléides et de leurs dépôts.

Il est important de prendre en compte toutes ces incertitudes pour que la simulation numérique puisse aider au mieux à la prise de décision. Une première étape a consisté à faire une analyse de sensibilité globale sur le cas de l'accident de Fukushima pour identifier les principales sources d'incertitudes. Les techniques d'analyse de Morris et Sobol ont été appliquées pour identifier et classer les sources d'incertitudes (Girard *et al.*, 2014 et 2016). Les résultats ont montré que les variables de la prévision météorologique et le terme source sont les paramètres les plus critiques.

Les incertitudes peuvent être modélisées par un ensemble de simulations, obtenues en perturbant les paramètres incertains du modèle de dispersion, certains paramètres d'entrée et en combinant de manière aléatoire un ensemble de termes sources et un ensemble de prévisions météorologiques. La perturbation des paramètres incertains peut ne pas être adaptée à la situation. Il est donc nécessaire de calibrer la distribution des paramètres incertains. Cela a été réalisé par optimisation de scores d'ensemble ou de scores probabilistes, en comparant les mesures dans l'environnement et les simulations.

L'étape de calibration requiert un grand nombre de calculs et une puissance de calcul trop importante. Un méta-modèle, c'est-à-dire une approximation mathématique, du modèle de dispersion qui consiste en une réduction de dimension et une émulation statistique du modèle a été construite. Il permet de calibrer les paramètres d'entrée grâce à des temps de calcul très raisonnables.

Ce travail a été fait avec le modèle de dispersion atmosphérique à longue distance, IdX, appliqué à l'accident de Fukushima. IdX fait partie de la plate-forme de modélisation C3X, utilisée pour la gestion de crise nucléaire.

➤ **Mardi 20 mars**  
à 20h45 ➤ Salle Spectacle

## Conférence « Il n'y a pas de programme génétique »

Pour progresser dans la compréhension du monde, les scientifiques doivent parfois rompre avec les connaissances et idées reçues de leur temps.

Et si nous n'étions pas les simples exécutants d'un programme inscrit dans nos gènes ? Et si le hasard réintroduisait une part de liberté dans la biologie ?

Les êtres vivants ne sont pas gouvernés par un programme génétique omnipotent. Il est maintenant clairement démontré que le hasard se niche au cœur des organismes, dans le fonctionnement des gènes et des cellules, et y joue un rôle encore largement sous-exploré. Alors que pendant longtemps, la biologie a été dominée par des théories finalistes puis « déterministes », les résultats expérimentaux obtenus ces toutes dernières années annoncent un changement de perspective radical.

La nouvelle biologie, par son caractère probabiliste, rendra caduque l'idée même de programme et de déterminisme génétique – conception communément qualifiée de thèse du « tout génétique » – forgée à la suite de ce qu'il a été convenu d'appeler le « dogme central de la biologie moléculaire » (Francis Crick, 1958).

La question passionnante qui s'ouvre consiste à comprendre comment, à partir du hasard moléculaire, se construit le vivant.

### Avec

- **Olivier Gandrillon**,  
biologiste systémique, directeur de recherche au CNRS,  
Laboratoire de biologie et modélisation de la cellule, ENS Lyon.



**➤ Mercredi 21 mars**

08h40 Salle Spectacle

**SESSION PLÉNIÈRE****Béton et matériaux cimentaires****Président : Georges Nahas**

Professeur associé ENS Paris Saclay

Pôle sûreté nucléaire

**Ekóé KANGNI-FOLI** - Apport de matériaux cimentaires modèles à la description des cinétiques de carbonatation de bétons bas-pH : conséquences sur la microstructure, le transfert de gaz et la déformation.

**Florian OUVRIER-BUFFET** - Développement et qualification de méthodes non-destructives ultrasonores pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton.

**Adrien SOCIÉ** - Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires.

**Ashish RAJYAGURU** - Capacité de prise en compte des perturbations chimiques par les codes couplés chimie-transport : une étude « expérience vs. simulation numérique » de l'impact des panaches salins.



**Sujet de la thèse :****Apport de matériaux cimentaires modèles  
à la description des cinétiques de carbonatation de bétons bas-pH :  
conséquences sur la microstructure, le transfert de gaz et la déformation**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Ekoé KANGNI-FOLI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-DGE/SRTG/LETIS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Alexandre DAUZERES</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Baptiste d'ESPINOSE-(ESPCI PARIS)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Paris VI - Physique et Chimie des Matériaux - ED 397</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancement IRSN/CEA</b>

---

Les options d'architecture retenues pour la conception du site de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (CIGÉO) prévoient l'utilisation de matériaux cimentaires de types bas-pH (ciment portland + additions pouzzolaniques) dans les zones de scellements. Une option alternative pour le stockage de certains déchets vitrifiés est envisagée, avec la conception d'alvéoles entièrement en bétons bas-pH.

L'IRSN questionne la durabilité des éléments bas-pH, puisque des études récentes tendent à montrer une sensibilité accrue de ces matériaux vis-à-vis de la carbonatation atmosphérique (Auroy et al. 2015 ; Serdar et al. 2017). Ces études montrent, entre autre, une augmentation des propriétés de perméabilité suite à la carbonatation des éléments bas-pH corrélée à une plus grande distribution des tailles de pores et une fissuration plus importante.

Cette thèse porte sur l'étude de la cinétique de carbonatation des matériaux bas-pH. Nous avons recours à deux types de carbonatation, une carbonatation accélérée ( $P_{CO_2} = 3\%$ ) et une carbonatation atmosphérique ( $PCO_2 = 0,04\%$ ), réalisées en enceintes de carbonatation à 25°C et 55% d'humidité relative.

L'approche adoptée est multi-échelles et mutli-matériaux. Nous avons développé une méthodologie permettant la fabrication de matériaux bas-pH modèles, de microstructures variées et de complexité minéralogique croissante et contrôlée. La difficulté résidait dans la formulation puis l'ouvrabilité de mélanges à hautes teneurs en silice. Nos matériaux modèles se présentent d'une part, sous forme de poudres de C-(A-)S-H à différents ratio Ca/Si et Al/Si, d'autre part sous forme de pâtes, équivalents des C-(A-)S-H pulvérulents synthétisés. Des ciments bas-pH industriels ont également été fabriqués.

L'intérêt des poudres réside dans la caractérisation des états ultimes de carbonatation et dans l'étude du caractère représentatif de la carbonatation accélérée face à la carbonatation naturelle. Les pâtes sont destinées à un suivi de carbonatation par le biais de profils minéralogiques, à la quantification des produits de carbonatation, à l'estimation de leurs retraits de carbonatation et à la détermination de leurs évolutions microstructurales.

Les premiers résultats de carbonatation (accélérée et naturelle) mettent en avant la présence du même polymorphe de carbonate de calcium (la vatérite), caractéristique de la carbonatation des C-S-H. Les résultats appuient le caractère modèle des matériaux fabriqués et la représentativité de la carbonatation accélérée mise en œuvre.

Les travaux à venir porteront sur l'acquisition du reste des données expérimentales et la détermination grâce à ces données de la cinétique de carbonatation par modélisation, en couplant géochimie et transport, à l'aide du code HYTEC.

**Sujet de la thèse :****Développement et qualification de méthodes non-destructives ultrasonores pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton**

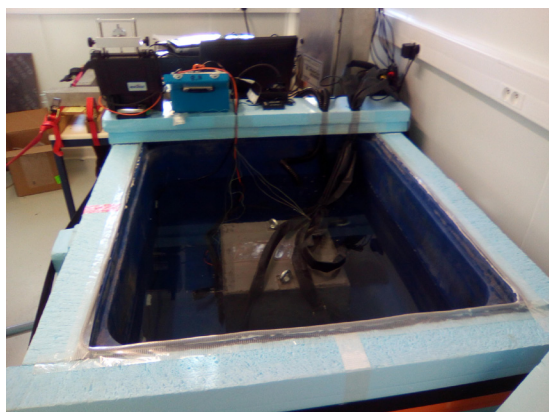
Doctorant :	Florian OUVRIER-BUFFET
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Benoît DURVILLE
Directeur de thèse :	Vincent GARNIER – Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)
École doctorale :	Aix Marseille Université
Sciences pour l'Ingénieur :	Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique ED353
Financement de thèse :	IRSN

Le projet international ODOBA coordonné par l'IRSN vise à étudier deux pathologies de vieillissement qui pourraient affecter les bétons d'enceintes et les radiers des centrales : la Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alcali Granulat (RAG). Leur détection et caractérisation par Contrôles Non Destructifs (CND) en acoustique linéaire (AL) et non linéaire (ANL) constitue l'objet de cette thèse. L'objectif principal est de détecter le plus précocement possible l'apparition de ces pathologies dans des massifs de béton épais. Ensuite, le second objectif est d'en caractériser la position et l'étendue. Ce dernier point est un enjeu majeur du fait de l'hétérogénéité et de l'atténuation du matériau béton.

Les essais portent sur trois échelles croissantes en dimensions et en complexité permettant de passer progressivement des mesures en laboratoire à une méthode de mesures applicable *in-situ*.

Les essais sur de petites éprouvettes (7x7x28 cm) atteintes de RSI ont permis en 2017 de tester la faisabilité et la sensibilité de différentes techniques de CND ultrasonores. Aucun résultat expérimental, y compris en ANL, n'a permis de mettre en lumière un endommagement, pour une expansion d'éprouvette RSI (non contrainte) atteignant 0,2%. Les propriétés mécaniques du béton, tel que le module dynamique, n'ont pas diminué. Le paramètre non linéaire non classique, très sensible à la qualité des contacts et des liaisons des constituants internes du béton, est également resté constant. Ces essais seront renouvelés sur des éprouvettes contraintes (pour se rapprocher des conditions *in-situ*) : l'endommagement résultant de gonflements contrariés serait alors probablement détectable par ANL.

Des blocs de plus grandes tailles (40x40x40 cm) ont été coulés : bloc RAG et bloc de référence. Ces blocs ainsi que 2 autres permettront la mise au point en 2018 d'une méthode de CND dénommée « DAET », par formation de voies, dans le but de déterminer la non-linéarité du matériau en profondeur, au fil de son vieillissement accéléré.



En vue du test de la méthode sur site, un bloc de 20 tonnes à forte pathologie RAG et RSI a été coulé sur ODOBA à Cadarache. Ce bloc et ses équipements permettront de valider la méthode et le dispositif développés.

Figure 1 : Enceinte de vieillissement accélérée contenant un bloc de béton RAG 40x40x40 cm instrumenté.

**Sujet de la thèse :****Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires :  
vieillessement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires**

<b>Doctorant :</b>	<b>Adrien SOCIÉ</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>09 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA / LPTM</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric PERALES</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yann MONERIE – Laboratoire Mécanique et Génie Civil - Montpellier</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Information, Structures, systèmes, Université Montpellier</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Dans le cadre de l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires, différents travaux de recherche visent à évaluer le vieillissement des infrastructures nucléaires et de leurs matériaux. Cette thèse porte sur le vieillissement des bétons dont les propriétés apparentes influencent directement les capacités de confinement de l'enceinte des réacteurs.

L'objectif de ce travail est la compréhension, à l'échelle d'une collection de granulats, de l'impact d'une dégradation chimique telle que la Réaction Sulfatique Interne (RSI) sur les paramètres matériaux (coefficient de diffusion et ténacité apparente du béton). La RSI est une pathologie endogène issue d'une exposition à des températures supérieures à 65°C au jeune âge et à une forte humidité relative. Elle est causée par une formation tardive d'ettringite différé dans le matériau durci entraînant des gonflements locaux dans la pâte de ciment et une fissuration du matériau par déformations différentielles. Les fissures créées constituent alors le lieu privilégié d'une nouvelle précipitation d'ettringite [Brunetaud 05]. Le laboratoire commun MIST (IRSN-CNRS-UM) propose une approche micromécanique pour l'étude fine de la multifissuration et de la rupture des matériaux hétérogènes en présence de couplages multiphysiques (chargements thermiques, diffusion d'espèces, etc.). Cette approche est basée sur une partition volumique / surfacique aux éléments finis : chaque maille porte un comportement durcissant et chaque frontière entre les mailles porte un comportement adoucissant lié à la fissuration (zone cohésive dans le logiciel XPER développé dans le cadre du MIST).

Une modélisation chimio-mécanique est proposée afin de représenter l'impact de la précipitation d'ettringite sur les propriétés matériaux. Le modèle chimio mécanique permet de prendre en compte la diffusion d'espèces entraînant la précipitation (chimique) de l'ettringite mettant sous pression le milieu (mécanique). Dans la continuité des travaux de [Bichet 17] (couplage thermomécanique), le transport d'espèces prend en compte le domaine fissuré puis, par un modèle chimique simple, la concentration d'ettringite précipité est estimée. Une suppression locale associée est évaluée pour alimenter le modèle microporomécanique de la pâte de ciment et la loi cohésive de pression post-rupture.

Les travaux de première année ont été consacrés à la mise en place du modèle, à l'implémentation de cette pression d'ettringite post-rupture dans Xper et à l'estimation par homogénéisation analytique de la dégradation de la matrice cimentaire. En seconde année, l'implémentation permettra d'effectuer une étude paramétrique du système afin de déterminer, à terme, l'impact de la Réaction Sulfatique Interne sur les paramètres mécaniques du béton (diffusion et ténacité).

**Sujet de la thèse :**

**Capacité de prise en compte des perturbations chimiques par les codes couplés chimie-transport : une étude « expérience vs. simulation numérique » de l'impact des panaches salins**

**Doctorant :** Ashish RAJYAGURU  
**Date du début de la thèse :** 02 / 11 / 2015  
**Laboratoire :** PSE-ENV / SEDRE / LETIS  
**Tuteur de thèse :** Charles WITTEBROODT  
**Directeur de thèse :** Vincent LAGNEAU - Mines Paristech ; Sebastien SAVOYE- CEA Saclay  
**Ecole doctorale :** Paris VI – Géosciences et ressources naturelles – ED 398  
**Financement de thèse :** IRSN / CEA / BEL V

---

Several countries have proposed to confine their radioactive waste in deep geological facilities based upon a multi-barrier system. In France, Switzerland and Belgium, argillaceous formations are considered as a potential host-rock for such facilities as they display very good containment properties, *i.e.* high retention capacity and very low permeability. However, the anthropogenic materials (*e.g.* waste, steel, concrete, *etc.*) are out of equilibrium regarding the *in situ* physicochemical conditions and thus they can react with the natural medium. For instance, large amount of soluble salts contained in some radioactive wastes are expected to be leached, generating a saline plume towards the natural medium. The presence of saline plume may enhance some physicochemical reactions such as dissolution/precipitation. In this situation, these reactions may alter the host-rock containment properties and therefore alter transport properties of some radionuclides. Thus, the evolution of rock containment properties due to mineral dissolution/precipitation needs to be envisaged for geologic time and space scale. Such impacts can be estimated at lab scale, which can be further extrapolated for larger time and space scales using chemistry transport codes.

But, prior to such long term simulations, it is essential to test the robustness of the physical and empirical laws used in these codes to reproduce mineral precipitation impact on total porosity of studied porous sample and on subsequent tracer diffusivity. However, these claystones are composed of diversified minerals and very low accessible porosity (of size few nanometers). The clayey minerals present in these claystones possess strong negative charge due to which there is sorption of cations, and anion exclusion through pore network. Thus for claystones it is complex to derive interpretable mineral precipitation impacts on total porosity and tracer diffusivity. For this reason in first step, mineral precipitation was studied on simple material chalk which is composed of calcite with presence of cocolithos adding heterogeneities into the system. Moreover, as chalk pores have neutral surface, there is no alteration in cationic and anionic diffusion making it a system with limited degrees of freedom. In our study, mineral precipitation was carried out by two extremities of sulfate alkali family: sparingly soluble barite of slow kinetics and fairly soluble gypsum of fast kinetics. The precipitation of these minerals in chalk and their subsequent impact on tracer diffusivity was carried out using a classical through diffusion setup. At the end of experiment, barite and gypsum precipitated samples were subjected to post-mortem imaging using: X-ray micro-tomography ( $\mu$ CT) and Scanning Electron Microscopy (SEM). These imaging techniques allowed us to determine the distribution and morphology of mineral precipitates in chalk matrix.

The lab-scale chalk results were finally reproduced by means of 1D and CrunchTope simulations. At the end of simulations, the experimental and numerical results would be compared to assess two important parameters: (i) can codes reproduce precipitation impact on porosity for simple chalk system and (ii) can codes reproduce the precipitation impact on diffusivity? The assessment of both of these parameters would hence determine the robustness of these codes for simple systems. In addition to this, quasi 2D simulations were also carried out under a heterogeneous porosity field to determine the impact of such porosity field on numerical evolution of barite and gypsum. In addition to chalk, we are also studying barite and gypsum precipitation in compacted kaolinite and cesium-illite clayey materials. Kaolinite has low negative surface charge with pore size close to claystones. Cesium-illite, in our study is a modeled material with higher anionic exclusion and cationic sorption compared kaolinite and pore size smaller than kaolinite case. This second part of our study will thus demonstrate whether if barite and gypsum will precipitate in similar fashion as we move from simple material as chalk until complex material as illite.



## ➤ Mercredi 21 mars

10h45 Salle Spectacle

### SESSION PLÉNIÈRE

#### **Irradiation / pathologies**

**Président : Patrick Laloi**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Annaïg BERTHO** - Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique : modélisation pré-clinique et aspects radiopathologiques.

**Alexia LAPIÈRE** - Effet d'un traitement par des probiotiques (*Faecalibacterium prausnitzii*) sur les atteintes du côlon radio-induites. Potentialisation de l'effet thérapeutique par les cellules stromales mésenchymateuses.

**Alexandre RIBAUT** - Effet thérapeutique des exosomes dans le traitement des lésions radio-induites musculo-cutanées.

**Sujet de la thèse :****Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique :  
modélisation pré-clinique et aspects radiopathologiques**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Annaïg BERTHO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SAN / SERAMED / LRMed</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Agnès FRANCOIS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Agnès FRANCOIS - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>UPMC / Physiologie, Pathologie et Thérapeutiques (P2T)</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La radiothérapie stéréotaxique est une technique de pointe permettant l'irradiation de très petits volumes avec une précision millimétrique. La réduction du volume irradié permet l'utilisation de fortes doses, dites ablatives, allant de 6 à 20 Gy par fraction. La radiothérapie stéréotaxique est utilisée comme alternative à la chirurgie pour traiter les tumeurs pulmonaires non à petites cellules.

Malgré la réduction du volume de tissu sain pulmonaire irradié, les patients développent des effets secondaires comme des pneumopathies radiques et des fibroses pulmonaires. Aujourd'hui, le manque de données radiobiologiques aux fortes doses par fraction reste une problématique. Le but est donc l'étude des conséquences radiobiologiques et radiopathologiques de l'irradiation stéréotaxique.

Le SARRP est un système de micro-irradiation guidée par l'image et couplé à un logiciel de plan de traitement qui nous permet de simuler la radiothérapie stéréotaxique chez la souris. Notre objectif est d'acquérir *in vivo* des données radiopathologiques, considérant l'effet du volume irradié, de la dose totale délivrée ainsi que du fractionnement. Les 1ères irradiations réalisées ont permis d'observer l'effet du volume irradié grâce à l'utilisation de 4 collimateurs : 10x10 mm<sup>2</sup>, 7x7 mm<sup>2</sup>, 3x3 mm<sup>2</sup> et Ø1 mm, pour une dose unique de 90 Gy délivrée en arc-thérapie, centrée sur le poumon gauche. L'analyse histologique montre que la taille des septa alvéolaires est en adéquation avec la réaction tissulaire et marque la répercussion en dehors du volume cible. L'analyse montre également une diminution du nombre de cellules de Clara, impliquées dans la régénération de l'épithélium bronchiolique. Les irradiations pour l'étude de l'effet de la dose sont en cours. La contention et le repositionnement des souris pour l'irradiation fractionnée est au point et un premier protocole de 3x20 Gy a été testé sur quelques animaux.

*In vitro*, afin de déterminer la réponse cellulaire aux fortes doses par fraction, différentes lignées cellulaires pulmonaires sont irradiées suivant 5 protocoles de fractionnement, à dose par fraction variable et à BED (*Biological Effective Dose*) constante, et analysées 7 jours post-irradiation. Une carte à façon rassemblant 44 gènes a été construite et les analyses sont en cours. L'expression protéique ainsi que des mesures multiples (apoptose, senescence et cycle cellulaire) permettront d'obtenir une cartographie de la réponse des différents types cellulaires pulmonaires aux fortes doses par fraction.

La modélisation préclinique associée aux données radiobiologiques sur les différents types cellulaires pulmonaires permettent de mieux comprendre les risques et les effets de la radiothérapie stéréotaxique sur les tissus sains.

**Sujet de la thèse :**

**Effet d'un traitement par des probiotiques (*Faecalibacterium prausnitzii*)  
sur les atteintes du côlon radio-induites. Potentialisation de l'effet thérapeutique  
par les cellules stromales mésenchymateuses**

**Doctorant :** Alexia LAPIÈRE  
**Date du début de la thèse :** 02 / 11 / 2016  
**Laboratoire :** PSE-SAN / SERAMED / LRMED  
**Tuteur de thèse :** Alexandra SEMONT  
**Directeur de thèse :** Marc BENDERITTER – IRSN / Jean-Marc CHATEL - INRA  
**École doctorale :** UPMC / ED 394, Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique  
**Financement de thèse :** IRSN

---

La radiothérapie est l'un des traitements les plus utilisés pour soigner une grande variété de cancers de la zone pelvienne. L'irradiation des tissus environnant la tumeur entraîne des effets secondaires plusieurs années après la fin du traitement. L'apparition tardive de symptômes spécifiques a donné lieu en 2010 à la définition d'une nouvelle pathologie, la « *Pelvic Radiation Disease* ». Parmi les différents symptômes, les dysfonctionnements du tractus digestif altèrent considérablement la qualité de vie des patients. Ils ont pour origine le déclenchement d'une forte réponse inflammatoire suite à la perte de l'intégrité d'organes fortement radiosensibles (côlon et rectum).

Plus récemment, il a été démontré une modification de la diversité du microbiote intestinal après radiothérapie, avec en particulier une diminution des populations de *Faecalibacterium prausnitzii* (Fp). Dans des conditions physiologiques, Fp joue un rôle important dans le maintien de la barrière intestinale. Au sein du LRMED, un effet thérapeutique des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) a été démontré dans un modèle animal d'ulcération radio-induite du côlon, mais il reste cependant partiel. Cette étude s'inscrit dans la potentialisation de cette thérapie cellulaire, en associant aux CSM une administration de Fp. Le premier objectif de cette thèse est de démontrer l'effet bénéfique de Fp.

Dans ce but, nous avons étudié 72h après irradiation colorectale de 29 Gy, l'effet de l'administration quotidienne de Fp ( $10^9$  CFU). Le traitement commence 3 jours avant l'irradiation et se poursuit jusqu'à l'euthanasie des animaux. L'intégrité de la barrière colique a été évaluée par une analyse des altérations histologiques et de l'état de renouvellement de l'épithélium colique (coloration HES et marquages des cellules épithéliales proliférantes et des cellules souches SOX9). Nous avons également traité les rats à plus long terme, jusqu'à 4 semaines après irradiation colorectale. Différentes modalités d'administration ont été testées (gavage quotidien ou un jour sur deux) afin de déterminer quelle modalité est la plus efficace.

Nos résultats semblent montrer que l'administration journalière à court terme de Fp diminue les dommages radio-induits de la muqueuse colique. Ce traitement réduit les zones de cryptes atypiques et augmente la capacité proliférative des cellules épithéliales ainsi que le nombre de cellules souches SOX9. L'administration du traitement un jour sur deux à long terme semble montrer un effet bénéfique.

Ces résultats préliminaires suggèrent que l'administration de Fp aurait une action radio-protectrice sur les dommages de l'épithélium colique. Des analyses de l'apoptose des cellules épithéliales est en cours pour compléter ces résultats.



**Sujet de la thèse :**  
**Efficacité thérapeutique des exosomes**  
**dans le traitement des lésions radio-induites musculo-cutanées**

Doctorant :	Alexandre RIBAULT
Date du début de la thèse :	28 / 09 / 2015
Laboratoire :	PSE-SAN / SERAMED / LRacc
Tuteur de thèse :	Stéphane FLAMANT - IRSN
Directeur de thèse :	Radia TAMARAT - IRSN
École doctorale :	UPMC / ED394 Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique
Financement de thèse :	IRSN

---

**Introduction :** le potentiel thérapeutique des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) pour traiter des brûlures radiologiques a été démontré dans plusieurs études précliniques et chez les victimes d'accident d'irradiation aiguë. Leur effet thérapeutique est principalement assuré par leur activité paracrine, comprenant les microvésicules extracellulaires (MVE). Celles-ci regroupent les exosomes (30-150 nm) et les microparticules (MP ; 150-1000 nm).

Les objectifs de cette thèse visent à déterminer *in vitro* les conditions optimales de production des MVE puis à démontrer le potentiel thérapeutique des MVE pour le traitement des lésions radio-induites *in vivo*. Enfin, leur usage en tant que marqueur pronostique de toxicité radio-induite sera étudié.

**Méthodes / résultats :** les résultats *in vitro* suggèrent que la quantité et la nature des MVE produites par les CSM humaines dérivées de tissu adipeux et de moelle osseuse sont modulées selon le stimulus appliqué (hypoxie, irradiation).

Dans un modèle murin de lésion musculo-cutanée radio-induite, nous avons testé le potentiel thérapeutique des exosomes. Le suivi du score lésionnel indique un effet bénéfique des exosomes dès 3 jours post-injection, associé à une diminution du flux sanguin de la patte irradiée vers un niveau similaire à celui de la patte non irradiée. Des dosages de protéines circulantes et des immunomarquages des tissus prélevés sont en cours afin d'explorer leurs mécanismes d'action.

A l'aide d'un modèle de lésion *in vitro* (*scratch assay*), nous avons montré que les exosomes favorisent la migration et la prolifération des cellules endothéliales de derme via les voies de signalisation PI3K / Akt et TGF- $\beta$  / SMAD2.

Enfin, nous avons analysé les MVE d'une cohorte de patients sur-irradiés après radiothérapie, ayant développé des rectorragies de grade de sévérité variable. Un modèle de prédiction de risque a été développé, montrant que les MP issues de plaquettes, de cellules endothéliales et de monocytes déterminent le risque d'aggravation des rectorragies. Les exosomes, en revanche, ne contribuent pas à ce modèle de façon significative. Enfin, l'analyse protéomique du contenu des MP montre une différence d'abondance de protéines impliquées notamment dans l'angiogenèse, entre les patients de grade 0 et les patients de grade  $\geq 2$ .

**Conclusion / perspectives :** la production des MP et des exosomes dépend du *stimulus* appliqué. Les résultats *in vivo* montrent que les exosomes apportent un bénéfice thérapeutique précoce pour traiter les lésions radio-induites. Les composantes et mécanismes d'actions des MVE sont en cours d'analyse. Par ailleurs l'étude clinique permet de proposer les MPs comme biomarqueur pronostique des complications des radiothérapies.

## ➤ Mercredi 21 mars

14 h 55 Salle Spectacle

### SESSION PLÉNIÈRE

#### **Combustible / milieux poreux**

**Président : Thierry Bourgois**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Zhenhai ZOU** - Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé.

**Mathilde GESTIN** - Etude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température des gaines de crayons de combustible des centrales nucléaires en alliage de Zircaloy-4.

**Juan David PENA CARRILLO** - Étude expérimentale du transfert pari / fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur / gouttes dans une géométrie tubulaire.

**Jianwei SHI** - Influence de la porosité sur les transferts thermiques au sein des chemins de câbles.

**Sujet de la thèse :****Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé**

---

<b>Doctorant :</b>	Zhenhai ZOU
<b>Date du début de la thèse :</b>	26 / 09 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PSN / SEMIA / LIMAR
<b>Tuteur de thèse :</b>	Pierre RUYER
<b>Directeur de thèse :</b>	Pascale AUSSILLOUS - IUSTI CNRS
<b>École doctorale :</b>	Aix-Marseille Université sciences pour l'ingénieur Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Lors d'un hypothétique accident d'insertion de réactivité (RIA), le combustible nucléaire fragmenté, initialement confiné au sein d'un crayon par un gainage métallique, peut entrer en contact avec le fluide caloporteur en cas de rupture de cette gaine. Les conséquences de l'interaction qui en résulte pourraient remettre en cause l'intégrité du circuit primaire. Elles sont étudiées par l'IRSN. La violence de l'interaction dépend notamment fortement du débit de l'écoulement des fragments hors du crayon. La compréhension des phénomènes gouvernant ce débit reste limitée, l'observation expérimentale directe du phénomène étant inenvisageable dans une expérience intégrale comme celles prévues dans le programme international d'essais au sein du réacteur CABRI. Ce travail de thèse consiste en l'étude de ce débit en se plaçant dans une configuration modèle.

La précédente thèse de Yixian ZHOU (2013-2016) avait notamment permis d'établir la loi de vidange d'un réservoir avec un orifice placé latéralement, ce qui représente la configuration d'écoulement pertinente, pour un milieu granulaire, représentant les fragments de combustible. La présente thèse a débuté par l'analyse d'une étude expérimentale complémentaire afin de mieux caractériser l'écoulement à proximité de l'orifice. Les champs de vitesse sont mesurés par corrélation d'image. En support à l'interprétation des expériences, différentes hypothèses de modélisation de l'écoulement (population discrète de particules, milieu continu avec une rhéologie visco-plastique) sont confrontées aux résultats expérimentaux à l'aide de simulations numériques.

Nous avons également étudié la vidange du silo assistée par une injection d'air (simulant la pression régnant dans le crayon combustible au moment de sa rupture) à une pression quasi-constante. Nous avons montré que les modèles d'Ergun et de Kozeny-Carman permettent de bien décrire l'écoulement d'air et de particules. L'air génère une force volumique sur les particules équivalente à un terme moteur pour l'éjection. Pour étendre l'applicabilité de cette étude à des situations plus similaires à la configuration d'intérêt, nous considérons désormais des transitoires d'éjection plutôt que des vidanges quasi-stationnaire. Nous avons ainsi conçu une expérience pour laquelle la vidange du silo se déclenche par rupture d'une membrane à un niveau de pression interne initialement imposé, ce qui se rapproche plus des conditions d'éjection de combustible lors d'un RIA par rapport à l'expérience initiale.

En perspective, nous réaliserons une expérience encore plus réaliste, avec une vidange au sein d'un liquide. Nous varierons également les caractéristiques du milieu granulaire en considérant un mélange de particules de plusieurs tailles. Ces études expérimentales seront accompagnées d'études théoriques et de simulations numériques.

## Sujet de la thèse :

**Etude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température  
des gaines de crayons de combustible des centrales nucléaires en alliage de Zircaloy-4**

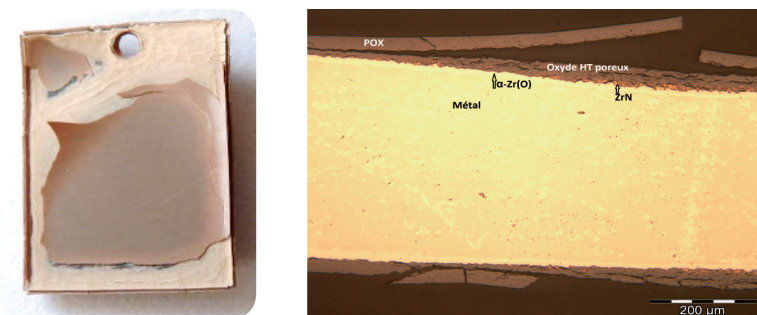
Doctorant :	Mathilde GESTIN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Loïc FAVERGEON / Michèle PIJOLAT - EMSE
Tuteur de thèse :	Olivia COINDREAU
École doctorale :	EMSE

Les piscines de stockage du combustible nucléaire permettent d'entreposer les assemblages combustibles, dans l'attente que leur puissance résiduelle soit suffisamment faible pour permettre leur évacuation, ou parce qu'ils sont destinés au rechargement du réacteur. En cas d'accident, une perte de refroidissement et / ou une vidange de la piscine pourrait conduire au dénoyage des assemblages combustibles. L'oxydation des gaines en alliage de zirconium (Zircaloy-4) par la vapeur d'eau et par l'air pourrait alors augmenter la vitesse d'échauffement des crayons et leur dégradation provoquant le relâchement des produits radioactifs.

Ces travaux de thèse entre dans le cadre du projet PIA DENOPI (DENOyage de Piscine), et portent sur l'étude des phénomènes d'oxydation à haute température dans un mélange d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau du Zy-4 pré-oxydé. L'objectif est de déterminer les mécanismes d'oxydation du Zircaloy-4 pré-oxydé et d'établir un modèle cinétique. Les échantillons utilisés sont des plaquettes de 3 cm<sup>2</sup> recouvertes d'une couche de pré-oxyde d'environ 30 µm d'épaisseur simulant la couche de corrosion formée sous eau en réacteur.

La prise de masse due à l'oxydation des échantillons est mesurée au moyen d'une thermobalance symétrique. Les essais réalisés en palier isotherme dans une gamme de 750 - 950°C sous air et vapeur d'eau confirment l'effet néfaste de l'azote lorsqu'il est associé à l'oxygène et / ou la vapeur d'eau. Grâce à des tests cinétiques utilisant la méthode des décrochements une dépendance en pression partielle d'azote, d'oxygène et de vapeur d'eau est observée. La mesure de la teneur en hydrogène dans le métal après oxydation montre qu'elle est corrélée à la pression partielle de vapeur d'eau ; associé à des mesures en <sup>18</sup>O, ils confirment l'oxydation simultanée par les deux oxydants (O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O). De plus, lors de l'oxydation la morphologie des échantillons évolue (fig.1), le pré-oxyde se désolidarise du métal et les contraintes exercées sur le métal par la formation de l'oxyde induisent le fluage de l'échantillon. A partir de ces différentes observations, un modèle cinétique est en cours d'élaboration, permettant de rendre compte de la dépendance de la vitesse d'oxydation avec les différents paramètres (température, pression partielle, épaisseur de pré-oxyde).

Fig. 1 :  
Effet de l'oxydation  
sur du Zy-4 pré-oxydé



**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale du transfert paroi / fluide dans le cas d'un écoulement vertical  
vapeur / gouttes dans une géométrie tubulaire**

---

<b>Doctorant :</b>	Juan David PENA CARRILLO
<b>Date du début de la thèse :</b>	05 / 10 / 2015
<b>Laboratoire :</b>	PSN / SEMIA / LIMAR
<b>Tuteur de thèse :</b>	Tony GLANTZ
<b>Directeurs de thèse :</b>	Michel GRADECK, Alexandre LABERGUE – Université de Nancy
<b>École doctorale :</b>	Université de Lorraine / Energie, Mécanique, Matériaux
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN (Projet ANR PERFROI)

---

L'un des accidents de dimensionnement d'un réacteur à eau pressurisée est l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). L'évènement initiateur d'un tel accident est une brèche sur le circuit primaire du réacteur entraînant une perte de l'inventaire en eau, une augmentation de la température des crayons combustible du cœur du réacteur, puis un assèchement des assemblages combustibles. Sous l'effet de la pression interne dans les crayons combustibles, les gaines peuvent alors se déformer et des zones bouchées apparaissent dans les assemblages entre les crayons déformés. Ces zones vont avoir un impact sur l'efficacité de refroidissement du cœur par les systèmes de secours lors de la phase dite de « renoyage ».

Dans le cadre du programme de recherche ANR PERFROI dédié à l'étude de ces phénomènes et piloté par l'IRSN, un banc expérimental a été développé (i.e. COLIBRI, Figure 1) afin de caractériser la capacité de refroidissement d'un assemblage combustible partiellement bouché par un écoulement diphasique de vapeur et de gouttes. L'étude porte sur un canal fluide formé par 4 crayons combustible déformés, qui est reproduit via l'utilisation d'un tube venturi. Plusieurs configurations géométriques de la zone bouchée, caractéristiques d'un APRP, sont testées (longueur et taux de bouchage). L'analyse thermo-hydraulique de l'écoulement diphasique est réalisée par trois techniques optiques : l'Anémométrie Phase Doppler (PDA) pour mesurer la distribution en vitesse et diamètre des gouttes, la Fluorescence Induite par Laser (LIF) pour mesurer la température des gouttes, et la thermographie infrarouge (IRT) afin d'estimer le flux de chaleur extrait par l'écoulement diphasique lors du refroidissement. Les résultats expérimentaux seront confrontés à une modélisation mécaniste prenant notamment en compte les échanges paroi / fluide, ainsi qu'aux résultats de simulation du logiciel DRACCAR développé à l'IRSN.

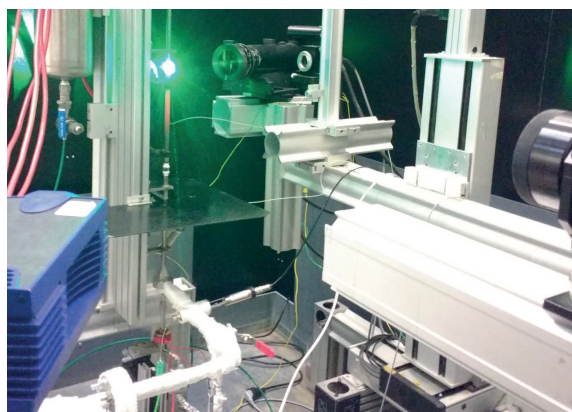


Figure 1. Banc expérimental COLIBRI

**Sujet de la thèse :****Influence de la porosité sur les transferts thermiques au sein des chemins de câbles**

**Doctorant :** Jianwei SHI  
**Date du début de la thèse :** 02 / 11 / 2016  
**Laboratoire :** PSN-RES / SA21 / LIE  
**Tuteur de thèse :** Germain BOYER  
**Directeur de thèse :** Jean-François THOVERT – Pprime- Poitiers  
**École doctorale :** Poitiers - Sciences et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique SI-MMEA (ED522)  
**Financement de thèse :** IRSN

---

Les installations nucléaires contiennent une importante masse de câbles, assemblés sous forme de faisceaux ou de chemins qui sont susceptibles, en cas de départ de feu, de subir une dégradation thermique et de dégager de grandes quantités d'espèces volatiles inflammables, pouvant avoir des conséquences notables sur la sûreté de l'installation.



L'IRSN s'intéresse notamment à deux types de câbles constitués de matériaux différents : le PVC et les composés de type PE / EVA contenant une charge minérale (typiquement de l'ATH). Or, la propagation du feu sur ces chemins de câbles dépend des propriétés thermiques et thermocinétiques (i.e. relatives à leur dégradation) de ces composés, mais également des résidus qu'ils forment au cours de leur pyrolyse. Dans ce contexte, la thèse vise à développer des modèles prédictifs de la pyrolyse de ces matériaux, prenant en compte les paramètres thermiques les plus sensibles.

Les travaux menés jusqu'ici ont montré que le taux de dégradation de ce type de matériaux dépend fortement de la conductivité effective et de la porosité des résidus. Malheureusement, la morphologie de ces résidus et leur conductivité sont très mal connues, et peuvent fortement varier d'un matériau à l'autre. Par exemple, un PVC peut être intumescent et conduire à la formation d'un résidu contenant des pores de grandes tailles, quand une matrice polymérique de type PE-EVA-ATH conduit à la formation d'un résidu minéral avec des pores de petite taille. Ainsi, l'influence de la porosité et de la morphologie des résidus sur leur conductivité effective ne sera pas la même dans les deux cas.

Le but de la thèse est donc de proposer un modèle de conductivité effective prédictif tenant compte de l'évolution d'une part de la morphologie du matériau au cours de sa dégradation et d'autre part de la conductivité de la matière à échelle locale. Pour cela des méthodes d'homogénéisation volumique sont utilisées qui s'appuient soit sur des tomographies, permettant une prise en compte de manière exacte de leur morphologie, soit sur des modèles de milieux synthétiques issus d'observations au microscope optique à balayage. Ce modèle sera ensuite implémenté dans le code ISIS, de simulation des incendies, et utilisé pour simuler la dégradation des matériaux considérés, mesurée sous cône calorimètre.



## ➤ Mercredi 21 mars

16 h 25 Salle Tournette

### SESSION PARALLÈLE

#### **Épigénétique**

**Président : François Bréchnac**

Directeur délégué à l'évaluation scientifique

**Rémi GUÉDON** - Contribution des processus épigénétiques dans la sensibilité et l'héritabilité de la réponse du nématode *Caenorhabditis elegans* à une exposition chronique aux rayonnements ionisants.

**Sophia MURAT EL HOUDIGUI** - Effet de l'exposition chronique aux rayonnements ionisants sur les mécanismes épigénétiques et leurs conséquences sur le développement du système nerveux central.



**Sujet de la thèse :**

**Contribution des processus épigénétiques dans la sensibilité et l'héritabilité de la réponse du nématode *Caenorhabditis elegans* à une exposition chronique aux rayonnements ionisants**

**Doctorant :** Rémi GUÉDON  
**Date du début de la thèse :** 13 / 10 / 2016  
**Laboratoire :** PSE-ENV / SRTE / LECO  
**Tuteur de thèse :** Catherine LECOMTE-PRADINES  
**Directeur de thèse :** Simon GALAS-CNRS / Catherine LECOMTE-PRADINES - IRSN  
**École doctorale :** Aix Marseille Université / ED251 - Sciences de l'environnement  
**Financement de thèse :** IRSN

Une exposition chronique à des rayonnements ionisants (RI) provenant de sources naturelles, anthropiques ou accidentelles peut entraîner des modifications des caractères observables (phénotypiques) des organismes exposés. Des études montrent que ces altérations peuvent être transmises d'une génération à l'autre et s'accompagner d'une aggravation des effets ou, inversement, d'une adaptation aux conditions environnementales. La transmission du phénotype peut s'expliquer par des modifications génétiques ou épigénétiques. Les marques épigénétiques sont des modifications réversibles et transmissibles (sans modification de la séquence d'ADN) qui modulent l'expression génique (transcriptome) en fonction de l'environnement. Les principales modifications épigénétiques impliquent: la méthylation de l'ADN, les modifications post-traductionnelles des histones et l'expression d'ARNs non codants (dont les miARNs).

Cette étude vise à identifier (I) les mécanismes moléculaires responsables des changements phénotypiques observés lors d'une exposition chronique aux RI sur plusieurs générations et (II) l'implication des mécanismes (épi)génétiques dans la régulation et la transmission d'informations entre les générations.

Notre étude, réalisée sur le nématode *C. elegans*, montre qu'une exposition à une dose de 50 mGy / h sur 4 générations entraîne une diminution de la reproduction de 37%, associée à une diminution du nombre de gamètes mâles. De plus, cet effet persiste chez la progéniture non exposée sur trois générations (diminution de 25% de la reproduction). L'analyse du transcriptome (ARNm et miARNs) montre des profils d'expression différents entre les conditions, y compris pour les générations replacées en conditions contrôle. Une analyse comparée des profils transcriptomiques (ARNm vs miARN) est en cours et devrait permettre d'identifier les voies de régulation impliquées dans la réponse au stress et la transmission des effets. L'expérimentation sur 4 générations a été reproduite sur des souches mutantes, privées respectivement d'une enzyme impliquée dans la méthylation de l'ADN et la modification d'histone. Nos premiers résultats montrent que ces mutations réduisent les effets de l'irradiation sur la reproduction.

En conclusion, ces résultats mettent en évidence que l'irradiation chronique altère les capacités de reproduction des organismes sur plusieurs générations et suggèrent l'implication de régulations épigénétiques. L'analyse des résultats de transcriptomique, complétée par une analyse du taux de modification des histones, permettra d'obtenir des signatures moléculaires descriptives des effets observés et d'identifier des voies de régulation spécifiques. Le rôle de ces voies sera évalué par des analyses fonctionnelles à l'aide d'organismes génétiquement modifiés. La contribution des modifications génétiques sera également évaluée par l'analyse des taux de mutation à partir des données de transcriptomiques.

**Sujet de la thèse :**

**Effet de l'exposition chronique aux rayonnements ionisants sur les mécanismes épigénétiques et leurs conséquences sur le développement du système nerveux central**

**Doctorant :** Sophia MURAT EL HOUDIGUI  
**Date du début de la thèse :** 03 / 10 / 2016  
**Laboratoire :** PSE-ENV / SRTE / LECO  
**Tuteur de thèse :** Olivier ARMANT  
**Directeur de thèse :** Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN  
**École doctorale :** ED251 - Sciences de l'Environnement - AMU  
**Financement de thèse :** IRSN

---

Une meilleure connaissance des effets d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants (RI) sur les organismes est nécessaire afin d'identifier des biomarqueurs d'effets précoces. Plusieurs études ont mis en évidence un impact des RI sur le développement du système nerveux central (SNC). Des embryons de poisson-zèbre exposés à une dose unique de 0,5Gy présentent une augmentation de l'apoptose au niveau du SNC. D'autre part, il est établi que les marques épigénétiques participent au contrôle des processus de développement embryonnaire, notamment la neurogenèse. Ces marques sont des modifications réversibles et transmissibles, qui n'altèrent pas la séquence de l'ADN, et modulent l'expression des gènes. Les RI induisent des modifications au niveau de la méthylation de l'ADN, avec pour conséquence des modifications de l'expression des gènes impliqués dans la réparation de l'ADN, du cycle cellulaire et de l'apoptose.

Dans ce cadre général, l'objectif du projet est de caractériser des biomarqueurs d'effets d'une exposition chronique aux RI en analysant les mécanismes (épi)génétiques, ainsi que leurs conséquences sur le développement du SNC au cours des étapes de développement précoce du poisson-zèbre (*Danio rerio*).

Des œufs fécondés ont été exposés à 5 débits de doses (5 $\mu$ Gy / h à 50mGy / h), la valeur de DCRL (*Derived Consideration Reference Level*) étant de 42-420 $\mu$ Gy / h, du stade 4 cellules jusqu'au stade larvaire.

Au stade 24h, les embryons réalisent des mouvements spontanés contrôlés par les motoneurones et les neurones sensoriels de la moelle épinière. Une augmentation de l'activité embryonnaire à 5mGy / h a été mise en évidence, suggérant un impact des RI sur ce réseau neuronal. Des études comportementales sur la mobilité des larves (96h) sont en cours d'analyse. Le comportement est un paramètre intégrateur du fonctionnement d'un réseau neuronal permettant d'évaluer des paramètres importants pour la survie des organismes (fuite, prédation) et est complémentaire des analyses au niveau moléculaire. D'autre part, le marquage des foci  $\gamma$ -H2AX sur les embryons de 24h a permis de mettre en évidence des cassures doubles brins de l'ADN à 50mGy / h. D'autres analyses au niveau du génome et du transcriptome sont en cours de réalisation afin d'étudier l'impact des expositions des RI sur la méthylation de l'ADN *via* le séquençage au bisulfite et sur l'expression des gènes. Une analyse comparée des données de méthylation et de transcriptomique sera réalisée pour mettre en évidence des signatures moléculaires caractéristiques d'une exposition aux RI.

Ce projet permettra de caractériser les effets des RI au cours du développement d'un vertébré et leurs conséquences potentielles sur l'adaptation des organismes à leur milieu.



## ➤ Mercredi 21 mars

16 h 25 Salle Spectacle

### SESSION PARALLÈLE

#### **Neutronique**

**Président : Joachim Miss**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Léa TILLARD** - Étude de l'impact des options de gestions du plutonium et des actinides mineurs.

**Vaibhav JAISWAL** - Étude expérimentale des sections efficaces de diffusion de l'eau légère en spectre thermique, de leur dépendance en température et quantification des incertitudes associées.

**Sujet de la thèse :****Étude de l'impact des options de gestions du plutonium et des actinides mineurs**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Léa TILLARD</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SNC / LNC</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Jean-Baptiste CLAVEL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Eric DUMONTEIL - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Paris-Sud / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La France arrive à un tournant décisionnel en ce qui concerne l'évolution de son parc électronucléaire avec plus de 40 réacteurs qui dépasseront les 40 ans d'exploitation dans les 10 prochaines années. Quelles stratégies mettre en place à plus ou moins long terme pour pérenniser ou améliorer la sûreté du parc ? Faut-il renouveler les installations, quels sont les choix technologiques disponibles et leurs impacts ? Les lois relatives à la gestion des déchets radioactifs ont conduit à la rédaction de rapports pilotés par le CEA en 2012 et 2015, proposant des scénarios d'évolution du parc. Le scénario de référence présente le passage progressif du parc actuel vers des Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium de type Cœur à Faible effet de Vidange (RNR-Na-CFV).

Dans le cadre de ses missions, l'IRSN a été et sera vraisemblablement de nouveau amené à se prononcer sur la sûreté associée aux stratégies considérées en tenant compte de l'évolution des risques en termes de radio-toxicité, puissance résiduelle ou criticité. Cette évolution dépend des flux de matières et des inventaires (Plutonium, Actinides Mineurs...) mis en jeu à chaque étape du cycle du combustible. Pour estimer leur impact, il est nécessaire d'utiliser des outils dédiés à la simulation d'évolution dynamique de parcs nucléaires, permettant d'évaluer ces quantités dans l'ensemble des installations.

Ainsi depuis plusieurs années, l'IRSN participe au développement du code CLASS (*Core Library for Advanced Scenario Simulation*) dans le cadre d'une collaboration avec le CNRS, afin de disposer d'un code à l'état de l'art et entièrement maîtrisé (modèles, simplifications, incertitudes...). Ce code s'appuie sur des modèles physiques prédictifs permettant de modéliser le combustible à charger dans chaque réacteur en fonction de ses caractéristiques et contraintes et d'effectuer rapidement de nombreux calculs d'évolution du combustible, qui nécessitent l'utilisation de bibliothèques issues de calculs de neutronique effectués à l'aide du couplage de codes MCNP-VESTA, VESTA étant développé par l'IRSN.

L'objectif final de la thèse sera de simuler avec le logiciel CLASS des scénarios d'évolution du parc et d'étudier l'impact des options de gestion du plutonium et des actinides mineurs avec des RNR-Na-CFV en phase de sortie du nucléaire afin de pouvoir répondre aux questions soulevées. Il est donc nécessaire de développer au préalable des modèles physiques représentatifs des RNR-Na-CFV à l'aide de méthodes de prédictions innovantes nécessitant en amont la réalisation d'une étude détaillée du système (simulation du réacteur, évaluation et propagation des incertitudes...).

**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale des sections efficaces de diffusion de l'eau légère  
en spectre thermique, de leur dépendance en température  
et quantification des incertitudes associées**

<b>Doctorant :</b>	Vaibhav JAISWAL
<b>Date du début de la thèse :</b>	01/10/2015
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP/SNC/LN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Luiz LEAL
<b>Directeur de thèse :</b>	Valérie VALLET - Laboratoire PHLAM, Université de Lille, Sciences et Technologies
<b>Ecole doctorale :</b>	Ecole Doctorale Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (ED 104), Lille
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Safety analysis and design of nuclear systems rely on accurate computer simulation tools. These simulation tools take in basic nuclear cross-section data as an input to estimate the safety parameters of the nuclear systems and ensure its normal operation. Light water is the most widely used moderator in thermal nuclear reactors, such as pressurized water reactors (PWRs). Thermal scattering cross-sections are governed by the structure and dynamics of the water molecule. In the standard thermal scattering libraries, these effects are described by the  $S(\alpha, \beta)$  function which is often termed as thermal scattering law (TSL). Until recently, standard TSL data libraries have relied mostly on experimental data measured in the 60s and are based on physics models. Consequently, we still observe some discrepancies between the evaluation and benchmark results at reactor normal operating conditions, even with the most recent TSL data libraries. Experimental TSL for high temperature and pressure are very scarce. New experimental TSL data will support the development of a model-free thermal scattering evaluation, thus avoiding approximations. High resolution double-differential cross-section (DDXS) of light water at high temperature and pressure is of interest to the reactor physics community. In addition, quantification of experimental uncertainties, both the systematic and statistical plays a very important role in generating the data covariances and helps in cross-section validation.

Accurate TSL for light water are of prime importance for reactor physics applications and criticality safety studies. To generate new TSL for light water with a model-free approach, IRSN has performed inelastic neutron scattering measurements at two time-of-flight spectrometers, namely the IN4c and IN6, at the Institut Laue-Langevin (ILL), Grenoble. These two spectrometers allowed high resolution spectroscopy with a flexible energy and momentum transfer range. A corresponding set of molecular dynamics (MD) simulations using the POLARIS code with the TCPE potential has been carried out to complement this experimental data. DDXS, both from the experiment and MD simulations at different temperatures and pressures have been analyzed. Using experiments and MD simulations, the accuracy and reliability of the existing cross-section data can be improved and the uncertainties in the cross-sections can be quantified. A new TSL data library for light water incorporating both, the TOF experimental data from ILL and MD simulations has been developed and its validation with existing benchmarks is in process. The outcome of this study will lead to a better interpretation of the impact of temperature and pressure on TSL.

➤ la soirée de Mercredi 21 mars  
à 21 h 00 ➤ Salle Spectacle



➤ Jeudi 22 mars

09 h 00 Salle Lys Martagon

## SESSION PLÉNIÈRE

### Sciences sociales

**Président : Jean-Michel Bonnet**

Adjoint au Directeur

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Mathias ROGER** - Analyse sociologique de la gouvernance des risques : le cas des Évaluations Complémentaires de Sûreté suite à l'accident de Fukushima.

**Manon BRITEL** - Analyse psychosociale de la radioprotection dans le domaine médical : perspectives pour l'IRSN.

**Ismaïl Maël GOURMI** - Analyse socio-historique de choix controversés en matière de disposition de sûreté sur les INB Françaises : le cas des accidents graves.

**Oussama RABOUN** - Analyse et synthèse de l'information en support à la décision.



**Sujet de la thèse :****Construire la robustesse face aux risques imprédictibles :  
le cas du risque sismique pour les centrales nucléaires françaises**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Mathias ROGER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SHOT / LSHS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christine FASSERT</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Soraya BOUDIA – CERMES3</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris V – ED Sciences humaines et sociales</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR AGORAS</b>

---

La thèse s'inscrit dans le programme de recherche ANR AGORAS (Amélioration de la Gouvernance et des Réseaux D'acteurs pour la Sûreté nucléaire), plus particulièrement dans l'action 2 du premier volet. Cette action vise à étudier les évolutions dans la gestion de la sûreté nucléaire permises par le contexte qui fait suite un accident nucléaire majeure et en l'occurrence celui ouvert par les ECS post-Fukushima. Plusieurs travaux sont menés dans ce cadre. La présente thèse s'attache à étudier un objet technique particulier, à savoir l'évaluation du risque sismique.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le processus de création et de révision d'une méthodologie d'évaluation du risque ainsi que son articulation avec l'évolution des connaissances relatives au phénomène concerné. Il s'agit d'étudier comment, à partir de la connaissance scientifique d'un phénomène naturel en perpétuelle évolution, l'expertise agit pour effectuer une évaluation du risque à un instant « t » et comment de cette évaluation découlent des prescriptions concrètes applicables sur les installations. Ce processus sera étudié sur toute la temporalité du nucléaire civile, des années 1960 à nos jours, en accordant une place toute particulière à l'accident de Fukushima et ses suites. Il s'agira également d'étudier comment ce processus est, et a été, influencé par des éléments de contexte (politique, économique, culturel et sociale). Enfin, par une étude comparative du processus français avec ceux d'autres pays nucléarisés, il s'agira de faire ressortir les singularités hexagonales. Finalement, cette thèse aura pour double ambition de montrer l'impact de l'accident dans le processus de révision continue des démarches d'expertise et d'évaluation ainsi que de clarifier les leviers d'influence à la base du processus.

La thèse doit permettre d'identifier les caractéristiques du contexte post-accidentel qui ont rendu possibles des améliorations du corpus de connaissances et de compétences en sûreté. A l'issue de la thèse, il sera possible pour l'IRSN de mettre en perspective les caractéristiques du contexte post-accidentel et celles du processus d'« amélioration continue » de la sûreté. Ceci permettra de mieux apprécier les limites de ce dernier et de définir des orientations pour son amélioration. Cette mise en visibilité des caractéristiques du processus d'amélioration du corpus de connaissances et de compétences en sûreté doit également favoriser la réflexivité des experts sur leurs pratiques, en leur permettant de décrypter ce qui est souvent « naturalisé » dans l'institution : organisation de l'expertise et échanges entre généralistes et spécialistes, paradigmes de sûreté, modèles, etc. ...

**Sujet de la thèse :****Analyse psychosociale de la radioprotection dans le domaine médical :  
perspectives pour l'IRSN**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Manon BRITEL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>10 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SHOT / LSHS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel BOURGUIGNON – IRSN / Marie PREAU – GrePS Lyon 2</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Lumière Lyon 2 / ED 485</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

**Contexte :** dans un contexte d'augmentation significative et durable de l'exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants (RI) en imagerie médicale, notamment en mammographie, l'IRSN a pu constater que le grand public ne semble pas avoir de connaissances appropriées de ce sujet. Cependant, communiquer autour des RI revient à se confronter aux croyances, représentations et peurs qui construisent les représentations autour du « nucléaire ». Afin de faciliter la compréhension et orienter les comportements dans le sens de la prévention promue par l'IRSN, il est nécessaire d'investiguer à travers une étude psychosociale les représentations sociales du nucléaire dans le cas du dépistage du cancer du sein en mammographie.

**Méthodes :** pour répondre à cette demande, plusieurs recueils de données sont nécessaires :

- Une analyse du discours médiatique grand public, professionnel et institutionnel a été réalisée pour étudier le contenu de l'information aux différents niveaux concernés.
- Un recueil de données quantitatif auprès des femmes concernées par le dépistage organisé du cancer du sein, ainsi qu'auprès de celles concernées par le dépistage individuel a été réalisé auprès de 1300 femmes, et est en cours d'analyse. L'objectif est d'investiguer les représentations du dépistage et comment se positionnent les rayonnements ionisants dans le dépistage selon ces femmes.
- Un recueil de données auprès des professionnels concernés sera réalisé : les gynécologues et les généralistes parce qu'ils prescrivent ou invitent les femmes à réaliser une mammographie ; les radiologues et les manipulateurs parce qu'ils sont directement concernés par cet acte. Ce recueil vise à comprendre ce que pensent ces professionnels du dépistage et comment l'information circule entre eux et les femmes qui les consultent.

**Résultats et perspectives :** le premier recueil de données a permis de mettre en évidence la présence dans le corpus d'éléments de cette représentation, comme la transmission rigoureuse des recommandations nationales sur l'âge et la fréquence de dépistage. Il a également permis de montrer un paradoxe intéressant : la faible présence, ou l'absence de certains éléments de précaution, notamment ceux relatifs aux rayonnements ionisants en mammographie.

A la suite d'une analyse globale de ces différents recueils de données, nous pourrons mettre en évidence les éléments importants de cette représentation pour les différents publics concernés et ainsi apporter à l'IRSN des préconisations pertinentes.

**Sujet de la thèse :****Analyse socio-historique de choix controversés en matière de disposition de sûreté sur les INB Françaises : le cas des accidents graves**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Ismail Maël GOUMRI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SHOT / LSHS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Olivier CHANTON</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Soraya BOUDIA – Université Paris Descartes</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Descartes École doctorale Sciences Humaines et Sociales</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Projet ANR Agoras</b>

---

Le choix d'une stratégie de gestion du corium adaptée est devenu un enjeu pour la filière électronucléaire et notamment ses régulateurs (ASN, IRSN). Le corium se forme lors d'un accident nucléaire grave avec fusion du cœur. Ce magma est le produit de la fusion et de l'oxydation du combustible qui se combine avec les éléments qu'il rencontre (barres de contrôle, éléments internes de la cuve, acier de la cuve, béton du radier...). Si l'accident de Fukushima a rappelé le besoin d'apporter une solution fiable à ce risque désormais considéré comme possible, les questionnements autour de l'efficacité des solutions disponibles se pose et n'est pas nouvelle. L'objectif de cette thèse est de retracer la trajectoire de cet objet d'étude dans les processus scientifiques de connaissances et d'expertise, de la formalisation du problème scientifique aux solutions techniques proposées. Le travail de thèse s'articule autour de trois axes principaux :

- Comment le corium est-il devenu une question d'expertise ?
- Comment le *corpus* de connaissances sur le comportement du corium a-t-il été constitué ?
- Comment ces connaissances sont-elles mobilisées dans les processus de décision et particulièrement de dialogue technique ?

Dès la conception des premiers PWR dans les années 1960 aux Etats-Unis, la question de la prise en compte des accidents avec fusion du cœur dans le dimensionnement des centrales (et donc de parade pour gérer le cœur fondu) a fait l'objet de débats intenses au sein des experts américains. Néanmoins, jusqu'au milieu des années 1990, le paradigme dominant a été la prévention de la fusion du cœur, notamment par l'amélioration de la fiabilité des systèmes de refroidissement d'urgence (RIS en particulier) et par l'amélioration du facteur humain à travers des procédures de conduite spécifiques. Les années 1990 marquent un tournant dans l'approche de sûreté pour la troisième génération qui intègre à la conception la fusion du cœur comme un accident de dimensionnement. Néanmoins, comme le montrent plusieurs programmes de recherche et développement actuels, et notamment le programme *In-Vessel Melt Retention* (IVMR) piloté par l'IRSN, la controverse sur la fiabilité des systèmes de gestion du corium (particulièrement la rétention en cuve) perdurent au sein de la communauté internationale. Je souhaite replacer ces débats d'experts dans le contexte de forte concurrence internationale entre les concepts disponibles pour identifier les potentiels effets sur la prise de décision. Par ailleurs, mes recherches montrent l'impact important des accidents pour revoir les approches de sûreté et tout particulièrement pour reconsidérer le risque corium et inciter les acteurs à proposer des solutions innovantes à des problèmes parfois impensés ou sous-estimés.

**Sujet de la thèse :****Analyse et synthèse de l'information en support à la décision**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Oussama RABOUN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA / LIMAR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Eric Chojnacki</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Alexis Tsoukias – Université Paris Dauphine</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Dauphine / LAMSADE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR / AMORAD</b>

---

Mon projet de thèse s'intègre dans la question 8 de la stratégie scientifique de l'IRSN, visant à développer des méthodologies et des outils d'aide à la décision à caractère opérationnel.

Le but de ma thèse est de développer un cadre théorique et un outil informatique permettant de traduire des cartes de concentration de radionucléide en cartes d'impact environnemental ou économique dans le cadre d'une gestion de risque post-accidentel.

Afin d'illustrer les méthodes et outils développés, j'ai pris comme cas d'étude : un rejet accidentel de  $10^{15}$  Bq dans la rade de Toulon.

Pour mesurer l'impact, j'ai considéré les enjeux suivant : herbier de Posidonie, pêche, pisciculture, tourisme. Les données relatives à ces enjeux sont issues de données segmentées en 7 zones suivant le découpage fait par le Syndicat Intercommunal de l'Aire Toulonnaise (SIAT), dans le cadre du contrat de baie.

Pour prendre en compte l'aspect incertitude, 12 scénarios ont été simulés avec le logiciel STERNE créant ainsi une base de données représentative de concentrations possibles consécutives à un accident.

Pour définir les cartes de concentration, j'ai découpé la rade de Toulon en 97 zones « unitaires » pour lesquelles le niveau de concentration est considéré homogène.

La méthode d'analyse suivie pour construire des cartes d'impact à partir de cartes de concentration se définit en trois étapes :

- Définition et calibration de fonction de transfert. Il s'agit ici de construire des fonctions de transfert propres à chaque enjeu et indépendantes de la zone unitaire considérée qui associe un niveau d'impact à une concentration.
- Définition et calibration de fonction d'impact pour les zones unitaires. La méthode de type « utilité additive » consiste à croiser les niveaux d'impact calculés précédemment pour chacune des 97 zones unitaires avec les données SIAT.
- Agrégation des indicateurs construits. Dans cette étape, je distingue trois axes possibles d'agrégation : l'axe « enjeu », l'axe « géographique » et l'axe « incertitude ». La méthode d'agrégation retenue est une méthode de « rating » qui permet d'attribuer une « note » intégrant la diversité des situations que l'on projette sur un axe.

Au final, l'objectif suivi est d'aider un analyste ou un gestionnaire à mieux discerner les scénarios impactant le plus un ou plusieurs enjeux ou identifier les zones géographiques les plus vulnérables.

En perspective, je prévois sur le plan théorique d'intégrer un aspect de continuité ou de contrainte territoriale et de poursuivre le développement de l'outil informatique.



› Salle Veyrier

SESSION POSTERS  
Doctorants de 1<sup>ère</sup> année  
Pôle Santé Environnement

Dosimétrie, Epidémiologie, Radiobiologie, Sismologie, Risques environnementaux,  
Transferts dans la géosphère

- **Oumar Telly BAH** - Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire ( $I_2$ ) susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée.
- **Marion BELLONI** - Approche hiérarchique bayésienne pour l'estimation du risque de cancers radio-induits en situation d'expositions professionnelles multiples et incertaines. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire.
- **Hamza CHAIF** - Extraction des paramètres de sorption dans un référentiel de modélisation opérationnel alternatif au  $K_d$  : applicabilité des grandeurs définies en milieux contrôlés à des situations réelles.
- **Rafael CHAVES DEPTULSKI** - Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle de pores dans des milieux déformantes à l'aide de méthodes particulières (SPH).
- **Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC** - Assimilation de données pour l'estimation du terme source rejeté dans l'atmosphère lors d'un accident nucléaire et estimation des erreurs pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des radionucléides.
- **Marguerite MATHEY** - Quantification du champ de déformation 3D des Alpes occidentales et régions périphériques par géodésie spatiale et sismologie : interprétations tectoniques et apports aux calculs d'aléa sismique.
- **Arnaud MONTABERT** - Qualification des mouvements sismiques 2D et 3D vis-à-vis de différentes typologies de bâtiments..
- **Amandine MOREREAU** - Reconstitution, à partir d'archives sédimentaires, des concentrations et des sources de radionucléides artificiels ayant transité dans le Rhône et la Loire au cours de l'ère nucléaire.
- **Audrey SOULOUMIAC** - Étude mécaniste et écophysiological des transferts du carbone 14 aux poissons.
- **Flomin TCHAWÉ NZIAHA** - Simulations numériques de la propagation des ondes sismiques en milieux hétérogènes : impact de la variabilité spatiale des propriétés linéaires et non-linéaires du sol sur le mouvement sismique.
- **Valentin WALKER** - Étude du risque de cardiotoxicité radio-induite précoce chez des patientes traitées par radiothérapie pour un cancer du sein à partir d'une cohorte prospective.
- **Jiaxin XU** - Développement d'outils d'aide à l'expertise en spectrométrie gamma.

**Sujet de la thèse :**

**Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire (I<sub>2</sub>) susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée**

**Doctorant :** Oumar Telly BAH  
**Date du début de la thèse :** 06 / 11 / 2017  
**Laboratoire :** PSE-ENV / SRTE / LRC  
**Tuteur de thèse :** Didier HEBERT  
**Directeur de thèse :** Didier BOURLÈS (CEREGE), Denis MARO (IRSN)  
**École doctorale :** Aix-Marseille Université / ED 251 Sciences de l'environnement  
**Financement de thèse :** IRSN

---

Un réacteur nucléaire en situation accidentelle majeure est susceptible de rejeter dans l'environnement différents types de radionucléides dont les principaux, en termes de quantité rejetée ou de dose reçue par l'être humain à plus ou moins long terme, sont issus de la famille des gaz rares, de la famille du césium et de la famille de l'iode. Concernant l'iode, son isotope <sup>131</sup>I est particulièrement nocif pour l'être humain car il se fixe rapidement dans la glande thyroïde. L'iode peut être émis dans l'environnement sous différentes formes physico-chimiques particulières (aérosols) et gazeuses (iode inorganique, iode organique) et selon le scénario accidentel, une quantité importante est susceptible d'être émise sous forme d'iode moléculaire gazeux (I<sub>2</sub>). L'iode moléculaire gazeux peut évoluer rapidement dans l'atmosphère par photodissociation le jour en présence de composés comme l'ozone ou les composés azotés pour donner, par exemple, des composés particuliers. De ce fait, sa vitesse de dépôt est très difficile à évaluer dans l'environnement sans prise en compte de cette évolution. De plus, les études environnementales sur le comportement de l'iode moléculaire font apparaître des incertitudes sur sa vitesse de dépôt d'au moins un ordre de grandeur, sans quantification précise des effets de la physiologie du couvert végétal ou de phénomènes liés à la turbulence atmosphérique.

L'objectif de cette thèse est de quantifier précisément la vitesse de dépôt sec de l'iode moléculaire sur de l'herbe en fonction de sa physiologie (résistance stomatique) et de la turbulence atmosphérique (vitesse de frottement, flux de chaleur sensible).

La quantification du dépôt sec de l'iode moléculaire et la modélisation associée se feront lors de campagnes expérimentales en utilisant de l'iode stable (<sup>127</sup>I) comme traceur du dépôt. La méthode proposée repose sur l'émission d'iode moléculaire dans l'environnement au vent de la zone d'étude, et son prélèvement dans l'air et sur le substrat étudié. La vitesse de dépôt par temps sec, dont la dimension est celle d'une vitesse (m s<sup>-1</sup>), est le rapport entre la densité de flux de dépôt sur le substrat (µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) et la concentration atmosphérique au niveau du substrat (µg m<sup>-3</sup>). De plus, pour avoir une validation globale de cette modélisation, il est prévu une application aux rejets d'<sup>129</sup>I émis de façon chronique, mais dont la cinétique peut s'apparenter à un rejet accidentel, par l'usine ORANO au niveau de la plateforme technique de l'IRSN (PTILH) située sous les vents dominant de l'usine ORANO.

**Sujet de la thèse :**

**Approche hiérarchique bayésienne pour l'estimation du risque de cancers radio-induits  
en situation d'expositions professionnelles multiples et incertaines.  
Application aux travailleurs du combustible nucléaire**

<b>Doctorant :</b>	<b>Marion BELLONI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>04 / 12 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-SANTE / SESANE / LEPID</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Sophie ANCELET</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Chantal GUIHENNEUC - Université Paris-Descartes</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / Santé publique EDSP</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancement IRSN AREVA</b>

---

Les travailleurs du cycle du combustible nucléaire sont exposés - de manière chronique et à faible dose - à de multiples sources de rayonnements ionisants et agents chimiques, potentiellement cancérigènes. Les mineurs d'uranium sont ainsi soumis à une contamination interne par inhalation de gaz radon et de poussières d'uranium et à une exposition externe aux rayonnements gamma. Les travailleurs de la cohorte des TRAVAILLEURS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE potentiellement exposés à l'URANIUM (TRACY U) sont quant à eux soumis à une exposition externe aux rayonnements gamma et une contamination interne à des composés uranifères et autres agents chimiques. Il est donc légitime de se demander dans quelle mesure l'absence d'effet cancérigène notable à faible dose et débit de dose pour une exposition radiologique spécifique reste vraie dans une situation de co-exposition à plusieurs agents radiologiques et chimiques. En effet, l'impact de chaque source d'exposition est généralement évalué séparément. Deux grandes difficultés techniques existent en situation de co-exposition : 1) les données d'exposition sont corrélées car associées à un même scénario d'exposition, nécessitant l'utilisation de méthodes statistiques sophistiquées 2) les données d'exposition sont entachées d'erreurs de mesure. Ignorer ces incertitudes peut notamment conduire à des estimations de risque biaisées et une déformation de la relation dose-réponse.

L'objectif de cette thèse est d'estimer l'effet sanitaire corrigé des erreurs de mesure d'une combinaison d'expositions radiologiques et chimiques via le développement d'approches hiérarchiques bayésiennes. Un objectif de prédiction individualisée de risque chez un travailleur multi-exposé sera également visé.

Le premier axe de travail concerne la prise en compte d'une exposition chronique et simultanée au radon, poussières d'uranium et rayonnements gamma dans l'estimation du risque de décès par cancer du poumon dans la cohorte française des mineurs d'uranium. Une analyse descriptive des données d'exposition a été réalisée. Un modèle hiérarchique bayésien a été proposé pour l'estimation du risque de décès par cancer du poumon associée à une exposition monofactorielle au radon ou aux rayonnements gamma. Ces modèles vont servir de briques de base pour développer un modèle hiérarchique plus complexe intégrant le calcul de la dose absorbée totale au poumon due à l'exposition aux trois sources radiologiques et intégrant les erreurs de mesure sur les expositions. Un examen des différents logiciels possibles de calcul de dose est actuellement en cours, en collaboration avec des dosimétristes.

Le deuxième axe de recherche traitera de la co-exposition radiologique et chimique des travailleurs de la cohorte TRACY U.



**Sujet de la thèse :****Extraction des paramètres de sorption dans un référentiel  
de modélisation opérationnel alternatif au  $K_d$  : applicabilité des grandeurs définies  
en milieux contrôlés à des situations réelles**

---

Doctorant :	Hamza CHAIF
Date du début de la thèse :	09 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LR2T
Tuteur de thèse :	Laurent GARCIA SANCHEZ
Directeur de thèse :	François LAFOLIE - INRA
École doctorale :	Aix Marseille Université / Sciences de l'environnement ED 251
Financement de thèse :	IRSN / EDF

---

La sorption, désignant les processus de rétention des solutés sur les phases solides, joue un rôle critique dans le transfert des radionucléides dans les sols en contrôlant leur persistance en surface, leur disponibilité au transfert racinaire et leur migration verticale vers les nappes.

En évaluation, l'approche la plus répandue est celle du coefficient de partage, qui suppose que la sorption est une réaction instantanée, linéaire et réversible. Avec un seul paramètre (noté  $K_d$ ), elle permet de déterminer à tout instant la répartition des radionucléides entre phases liquide et solide. Mais ses hypothèses, très simplificatrices, ne sont pas toujours vérifiées (sorption non-équilibrée, saturation) et peuvent induire des erreurs dans l'estimation des temps de séjour des radionucléides dans les sols.

Parmi les approches alternatives au  $K_d$ , le modèle EK suppose des sites de sorption en équilibre avec la phase liquide (type 1) et d'autres régis par des cinétiques (type 2). Ce modèle, dont les paramètres peuvent être estimés au laboratoire à partir de données issues de réacteurs à flux (i.e. réacteur parfaitement agité à flux continu), rend mieux compte du non-équilibre et de la non-linéarité de la sorption. Cependant, cette approche ne peut être proposée en évaluation tant que ses paramètres et équations n'ont pas été étudiés à des échelles plus proches des conditions réelles.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la validité du modèle EK dans des systèmes plus complexes que les réacteurs à flux, et l'applicabilité des paramètres EK déterminés au laboratoire à des situations réelles. Les radionucléides étudiés sont le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{60}\text{Co}$ .

Des expériences de transport réactif en colonnes de sol viseront à valider l'approche EK au laboratoire. L'identification des paramètres de sorption se fera à travers deux approches : fréquentiste (moindres carrés) et bayésienne.

L'étude de profils de  $^{137}\text{Cs}$  observés *in situ* (base de données de 99 profils de césium dans différents sols réalisée à l'INRA) visera à valider l'approche EK sur le terrain et en particulier la capacité du transfert soluble modélisé à expliquer les profils observés. Cette base de données pourra être enrichie par d'autres profils par la suite.

Ce travail devrait conférer au modèle EK un degré de légitimité décisif en évaluation opérationnel dans le cas du césium et du cobalt, que l'on pourra par la suite étendre à d'autres scénarios (radionucléides, sols, conditions hydrauliques,...).

**Sujet de la thèse :****Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle des pores  
dans des milieux déformables à l'aide de méthodes particulières (SPH)**

<b>Doctorant :</b>	Rafael CHAVES DEPTULSKI
<b>Date du début de la thèse :</b>	02 / 10 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
<b>Tuteur de thèse :</b>	Magdalena DYMITROWSKA
<b>Directeur de thèse :</b>	Djimédo KONDO (UPMC)
<b>École doctorale :</b>	UPMC / ED Sciences mécaniques, acoustique, électronique & robotique (ED 391)
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Cette thèse vise à améliorer la compréhension des phénomènes de transfert de gaz importants pour la sûreté d'un stockage de déchets nucléaires géologique localisé dans une couche d'argilite peu perméable et saturée en eau. Pendant la durée de vie d'une telle installation, qui est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années, une importante production d'hydrogène est attendue à l'intérieur du stockage surtout liée à la corrosion anaérobie des éléments métalliques (colis, chemisages et soutènement). Pour pouvoir décrire la migration de gaz dans et autour du stockage, il est déterminant de disposer des lois de transferts, pertinentes à l'échelle macroscopique et en même temps cohérentes avec les mécanismes de transfert de gaz à l'échelle des pores.

Dans l'état de l'art actuel de ce type d'écoulements diphasiques sont modélisés comme des écoulements visco-capillaires dans des milieux poreux indéformables. Cependant des évidences expérimentales indiquent que la percolation de la phase gazeuse à travers les pores saturés des argilites a lieu à travers des chemins préférentiels s'accompagnant localement d'une dilatation de l'espace porale.

Afin de représenter ce couplage hydromécanique à l'échelle des pores, la thèse s'appuiera sur un code de simulation basé sur la méthode SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamics*) en développement à l'IRSN. Le code permet de résoudre dans un même formalisme SPH, pour une maquette tridimensionnelle d'un milieu poreux, l'équation de Navier-Stokes pour l'écoulement diphasique en tenant compte de la tension de surface et de la capillarité, ainsi que de traiter les phases solide élastique (matrice argileuse) et solide rigide (inclusions carbonatées ou silicatées). En plus, il permet aussi d'étudier les transformations morphologiques (fracturation) de la phase solide élastique par introduction des lois d'endommagement.

Le travail de thèse comprendra plusieurs étapes. Premièrement le comportement de la méthode SPH vis-à-vis de différentes lois d'endommagement va être testé afin de choisir celle qui sera le mieux adaptée pour l'application aux argilites. Ensuite un modèle représentatif du milieu argileux sera construit, dont les phases présentes seront paramétrées en cohérence avec leurs propriétés physiques. Il s'agira de tenter de reproduire en termes de contrainte, déformation et pression, des résultats expérimentaux présents dans la littérature. Enfin, la dernière partie consistera à proposer et implémenter un modèle d'échange de masse entre les phases afin de prendre en compte les phénomènes de dissolution et évaporation à l'interface liquide-gaz.

## Sujet de la thèse :

**Assimilation de données pour l'estimation du terme source rejeté dans l'atmosphère  
lors d'un accident nucléaire et estimation des erreurs  
pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des radionucléides**

Doctorant :	Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC
Date du début de la thèse :	01 / 02 / 2018
Laboratoire :	PSE-SAN/SESUC/BMCA & laboratoire CEREAs
Tuteur de thèse :	Anne MATHIEU / Olivier SAUNIER
Directeur de thèse :	Marc BOCQUET (Ecole des Ponts – CEREAs)
Ecole doctorale :	Université Paris-Est Sciences, Ingénierie et Environnement - SIE - ED 531
Financement de thèse :	IRSN

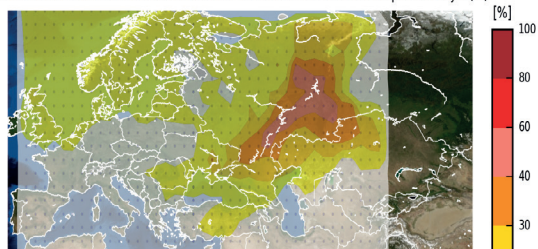
Lors d'un accident nucléaire, l'évolution temporelle des débits de rejet des radionucléides rejetés dans l'atmosphère (le terme source), la dispersion des radionucléides et leur dépôt dans l'environnement sont des éléments essentiels pour évaluer les conséquences environnementales et sanitaires de l'accident.

Il existe deux familles de méthodes pour estimer le terme source. La première consiste à modéliser l'état de l'installation et son évolution. La seconde famille de méthodes consiste à coupler les modèles de dispersion atmosphérique et les mesures environnementales pour en déduire le terme source. L'IRSN a développé un outil basé sur les techniques de modélisation inverse pour estimer les rejets à partir des mesures dans l'environnement. En effet, Winiarek et al. (2012), Saunier et al. (2013), Winiarek et al. (2014), Saunier et al. (2016) ont développé une méthode pour estimer le terme source en prenant en compte différents types de données d'observation. Cette méthode a été mise en œuvre sur le cas de l'accident nucléaire de Fukushima.

Les travaux de thèse visent à améliorer la méthode existante. Plus précisément, le développement de techniques d'assimilation multi-échelles pour la dispersion atmosphérique accidentelle et le calcul objectif des erreurs de l'estimation en tenant compte des erreurs de modélisation et d'observation de façon mathématiquement rigoureuse constituent les deux objectifs de la thèse. Concrètement, il est possible d'obtenir de meilleures exploitations des mesures environnementales, c'est-à-dire utiliser des méthodes statistiques pour satisfaire plusieurs exigences : indépendance des mesures, redondance de l'information, pondération des mesures, prise en compte simultanée de différents types de mesure. D'autre part, il serait très intéressant de modéliser les erreurs, ce qui passerait par l'utilisation de lois de distribution de probabilité a priori et d'approches Bayésiennes (Chaîne de Markov, Monte Carlo).

La méthode actuelle est basée sur des approches variationnelles couramment utilisées pour ce type d'application. Récemment, Liu et al. (2017) a estimé le terme source de l'accident de Fukushima en mettant en œuvre des techniques Bayésiennes. La première étape de la thèse consiste à appliquer les techniques proposées par Liu et al. (2017) pour analyser l'évènement de détection du Ruthénium en Europe survenu au cours de l'automne 2017.

Concentrations simulées et observées dans un facteur 2 en fonction du point de rejet (%)



Lors de la détection de radionucléides dans l'environnement comme c'était le cas pour l'évènement Ruthénium, l'IRSN cherche à localiser la source et à estimer les quantités rejetées. Des approches Bayésiennes sont donc en cours de développement pour estimer les distributions de probabilités permettant de mieux caractériser la source.

**Sujet de la thèse :**

**Quantification du champ de déformation 3D des Alpes occidentales et régions périphériques par géodésie spatiale et sismologie : interprétations tectoniques et apports aux calculs d'aléa sismique**

Doctorant :	Marguerite MATHEY
Date du début de la thèse :	01 / 09 / 2017
Laboratoire :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN & ISTERRE
Tuteur de thèse :	Stéphane BAIZE
Directeur de thèse :	Andrea WALPERSDORF, ISTERRE Grenoble
École doctorale :	Terre Univers Environnement, Université Grenoble Alpes
Financement de thèse :	IRSN & LABEX OSUG 2020

---

Les Alpes occidentales sont caractérisées par une sismicité faible à modérée. Le GPS (*Global Positioning System*) permanent a montré que le signal majeur de déformation actuelle dans les Alpes occidentales est une surrection atteignant 2 mm / an dans la haute chaîne (Serpelloni et al., 2013), sans raccourcissement correspondant. La déformation horizontale totale au travers des Alpes occidentales se caractérise actuellement par un mouvement transtensif de la plaque Adriatique par rapport à l'Eurasie stable, avec 0-0.3 mm / an en extension et décrochement dextre (Nocquet, 2012). Le mouvement vertical doit donc avoir d'autres moteurs que la tectonique des plaques.

**Cette thèse présente un double objectif :**

- (i) préciser le moteur de la déformation verticale,
- (ii) apporter des contraintes physiques au calcul d'aléa sismique probabiliste.

Le travail de thèse consiste pour cela à étudier les interactions entre déformations horizontale et verticale, et entre déformations de surface et sismicité. La difficulté du sujet réside dans la caractérisation d'une déformation de l'ordre du millimètre par an au maximum. Cependant les Alpes occidentales bénéficient d'une durée et d'une densité d'observations inégalées en Europe à cette échelle.

**Trois types de données seront intégrés conjointement au cours de cette thèse :**

- (i) les données sismologiques SISMalp (35 000 événements enregistrés depuis 1989) ,
- (ii) les données de GPS permanent (réseau RENAG depuis 1998) et de campagnes,
- (iii) les données d'interférométrie radar (InSAR) acquises depuis 2014 par le satellite Sentinel-1.

**Sujet de la thèse :**

**Categorizing 2D and 3D seismic motion in regard to building typologies.  
Development of a multidisciplinary approach in order to categorize seismic source and  
damage to the building : a seismological, archaeological and mechanical approach**

**Doctorant :** Arnaud MONTABERT  
**Date du début de la thèse :** 01 / 10 / 2018 01 / 10 / 2018  
**Laboratoire :** Laboratoire de Géologie de l'ENS  
IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN - IRSN / PSN-EXP / SES / BEGC  
**Tuteur de thèse :** Maria LANCIERI -Julien CLEMENT  
**Directeur de thèse :** Hélène LYON-CAEN - Laboratoire de Géologie,  
École Normale Supérieure / CNRS UMR 8538,  
PSL Research University, Paris 75005, France  
**École doctorale :** PSL Research University / ED560  
**Financement de thèse :** Bourse doctorale de l'École Normale Supérieure

---

The damage on buildings is often the only available datum on historical earthquake. Understanding the properties of seismic shaking on historical structure is a useful tool to improve knowledge of past seismicity. However, this is not a trivial task and its development requires a multidisciplinary approach including mechanical vibration, seismology, and archaeology. This innovative interaction draws the core of my PhD project.

On one side, structural models have to be both realistic and generic to represent an entire building typology. On the other side, the seismic motion has to be carefully selected and understood in particular looking at the 3 components (2 horizontal and 1 vertical) of the ground shaking. Indeed, the vertical component is often neglected in structural analysis. Thus there are no clear statements quantifying its impact on structural behavior, neither its peculiarities with respect to the horizontal components.

During these firsts months I am implementing a strategy aimed to describe the role of the vertical component on structural behavior. We know that the three components of the ground motion and their features depend on the rupture mechanism, on the wave propagation in the crustal and shallow layers and on the azimuth between the source and the station. The question is whether and how these characteristics are related with the structural behavior. Real data are affected by a huge complexity ; for this reason I am currently working with synthetic 3D waveforms, based on realistic rupture model, 1D layered crustal medium, and a full azimuth coverage.

The data are injected in a linear structural model based on finite element method analysis that I am currently refining: the impact of the ground motion on the results depends on the degree of complexity of structure model, but increasing the complexity also require longer computation times. Thus the lesson learned on this preliminary test will be applied to:

- optimize the strategy to analyze real data (what kind of signal treatment, rupture source, site-source geometry?).
- set the sufficient level of structural complexity.

The final aim is to compare the numerical structural analysis with the observed damage, for this reason several reconnaissance missions on historical / archaeological sites are scheduled on 2018 to choose the case of study.

keywords : seismology, mechanics, archaeology, archaeoseismology, vertical component, categorizing.

**Sujet de la thèse :**

**Reconstitution, à partir d'archives sédimentaires, des concentrations et des sources de radionucléides artificiels ayant transité dans le Rhône et la Loire au cours de l'ère nucléaire**

<b>Doctorant :</b>	<b>Amandine MOREREAU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LRTA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Hugo LEPAGE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Frédérique EYROLLE – IRSN / PSE-ENV / SRTE / LRTA</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Aix Marseille Université / ED251 Sciences de l'environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

L'évolution rapide des préoccupations environnementales, des techniques d'ingénierie ainsi que des choix politiques, a été très marquée au cours de l'ère nucléaire, conduisant à un manque d'informations sur les conséquences environnementales des expositions aux contaminants issus de ces installations industrielles du passé.

Cette thèse propose de reconstruire, pour plusieurs décennies passées, les concentrations en radioactivité associées aux particules ayant transité dans le Rhône et la Loire par l'analyse d'archives sédimentaires. Ces bassins versants sont principalement soumis à des apports en radionucléides issus des rejets des installations nucléaires (en routine, incidentels ou accidentels) et des apports d'origine naturelle ou anthropique dus à l'érosion, à l'altération et au lessivage des sols.

L'analyse des archives sédimentaires permettra de répondre aux trois objectifs suivants :

- Reconstituer l'origine et les concentrations des radionucléides liés aux particules sédimentaires pour les sources naturelles et artificielles (retombées des tirs atmosphériques, accident de Tchernobyl, industries nucléaires...);
- Estimer les flux de radionucléides particuliers ayant transité dans le Rhône et la Loire jusqu'aux exutoires;
- Evaluer les stocks de radionucléides rémanents dans ces zones d'accumulation sédimentaire.

Les archives sont d'abord scannées par rayonnement X pour obtenir les variations de densité et de chimie élémentaire à la surface de la carotte et optimiser la découpe des échantillons en fonction des strates. La datation est ensuite réalisée en mesurant les teneurs du  $^{137}\text{Cs}$ , du  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  et d'autres indicateurs. D'autres paramètres descriptifs sont caractérisés comme la granulométrie ou la teneur en carbone organique total...

Ensuite, les teneurs en radionucléides sont quantifiées sur une sélection de strates : émetteurs gamma à vie moyenne d'origine artificielle et naturelle, isotopes de l'uranium et du plutonium,  $^{14}\text{C}$  et tritium lié.

Trois archives ont déjà été collectées : en aval de la Loire et du Rhône, et sur le Rhône amont.

- L'archive collectée sur la Loire aval a été datée à partir de l'activité en  $^{137}\text{Cs}$  et permet de remonter jusqu'aux années 50 ;
- Les activités en  $^{137}\text{Cs}$  mesurées sur l'archive du Rhône aval comparées aux données de la surveillance montrent que la chute brutale en 1991 de la teneur en  $^{137}\text{Cs}$  serait due à l'installation d'une nouvelle station de traitement des effluents liquides du site de Marcoule.

Des travaux vont également avoir lieu pour définir des sites de carottage sur la Loire amont et sur la Saône, qui est un affluent majeur du Rhône dont les apports en radionucléides sont peu connus.

**Sujet de la thèse :****Étude mécaniste et écophysiological du transfert du carbone 14 aux poissons**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Audrey SOULOUMIAC</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>ENV / SRTE / LECO</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric ALONZO - IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Olivier SIMON – IRSN / Jean-Christophe POGGIALE - MIO</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Aix-Marseille université / ED251-Sciences de l'environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / EDF</b>

---

Le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) constitue avec le tritium ( $^3\text{H}$ ) l'un des radionucléides les plus rejetés dans les cours d'eau par les centrales nucléaires de production d'électricité en fonctionnement normal. Ces deux radionucléides contribuent majoritairement à la dose annuelle reçue par la population locale essentiellement par ingestion de poissons marqués. C'est pourquoi il est aujourd'hui nécessaire de s'assurer de la robustesse des modèles d'exposition des écosystèmes et des populations humaines vis-à-vis de la présence du  $^{14}\text{C}$  dans les cours d'eau.

Les modèles opérationnels actuels de transfert du  $^{14}\text{C}$  en milieu aquatique restent très simplifiés puisqu'ils ne prennent pas en considération l'influence potentielle des variations de spéciation et de biodisponibilité du  $^{14}\text{C}$ , ainsi que les transformations biochimiques intervenant au fil de la chaîne trophique. De plus de nombreux processus clés du métabolisme (ingestion, assimilation, croissance...) peuvent modifier le devenir du carbone en fonction des facteurs environnementaux forçants tels que la température ou la disponibilité de la nourriture. L'objectif de cette thèse est d'étudier le flux et la composition isotopique du carbone au sein des poissons et de produire des prédictions physiologiquement et écologiquement plus robustes à travers l'application de la théorie du Budget Énergétique Dynamique (DEB).

Ce projet se décompose en plusieurs volets. Dans un premier temps, le modèle DIB (Budget des Isotopes Dynamique), extension du modèle DEB développée en écologie fondamentale dans le cadre de l'analyse des isotopes stables ( $^{13}\text{C}$  et  $^{15}\text{N}$ ), sera adapté au cas du  $^{14}\text{C}$ . Ce modèle fera l'objet d'une analyse de sensibilité (MORRIS, SOBOL') afin de déterminer quels sont les paramètres qui ont une influence forte sur la teneur en  $^{14}\text{C}$  du carbone chez les poissons. Dans un deuxième temps, le modèle sera utilisé pour prédire les valeurs d'activité du  $^{14}\text{C}$  chez certaines espèces de poissons des cours d'eau français présentes dans la collection « AddMyPet » des modèles DEB déjà paramétrés (environ 1000 espèces). Les résultats seront comparés aux mesures des suivis radioécologiques, bancarisées dans la base de données SYLVESTRE de l'IRSN. Enfin une approche expérimentale sur une espèce robuste, l'Épinoche (*Gasterosteus aculeatus*) ou la Carpe commune (*Cyprinus carpio*), déjà paramétrées dans la collection AddMyPet, sera mise en œuvre afin de quantifier l'efficacité de transfert du  $^{14}\text{C}$  entre les poissons et les différents compartiments du réseau trophique aquatique (phytoplancton, zooplancton, sédiment, matière détritique) sous différents scénarios d'expositions (température, abondance de la nourriture...) et de mieux estimer les paramètres du modèle.



**Sujet de la thèse :**

**Simulations numériques de la propagation des ondes sismiques en milieux hétérogènes :  
impact de la variabilité spatiale des propriétés linéaires et non-linéaires du sol  
sur le mouvement sismique**

<b>Doctorant :</b>	<b>Flomin TCHAWÉ NZIAHA</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>06 / 11 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SCAN / BERSSIN et IFSTTAR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline GELIS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Fabian BONILLA - IFSTTAR</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Est / Sciences, ingénierie et environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

Surface ground motions are a result of seismic waves emitted during faults rupture processes; these waves travel through the earth's crust and then through superficial geological layers. The influence of the latter on the incident ground motion is known as "site effects" in seismological literature. In regions with high contrasts in soil properties (between sedimentary layers and the surrounding bedrock) and complex layers geometries as the case of sedimentary basins, the superficial layers tend to trap the seismic waves hence resulting in longer and more amplified motions. As a result, buildings and installations present in such areas are more likely to be damaged with the occurrence of an earthquake as it was the case during the Michoacán earthquake of 1985 in Mexico. It is therefore important to correctly assess site effects in order to better prevent such risks.

To this aim, numerical simulations provide a precious tool to understand the propagation of seismic waves in complex media. Recent studies (e.g. *Oral et al. 2017*) highlight the strong influence of the soil mechanical behavior on the wave propagation. Indeed, under strong motion, the soil behavior may become non-linear (soil properties depend on the level of strain). In *Oral et al. (2017)*, it was shown that considering excess pore pressure and non-linear effects in numerical simulations allowed to better reproduce observed data.

The goal of this thesis is to study from a physical point of view: 1) the impact of the spatial variability of the distribution of heterogeneities in media with linear and non-linear behavior on ground motion, 2) the impact of the source complexity on surface motions, 3) the structures response to the simulated wave field can be studied as well.

Our first case study is the sedimentary basin of Nice (a relatively small size basin) on which we study wave propagation considering different material rheologies. The results obtained from these numerical simulations are going to be used to quantify the basin response under different conditions. These results will allow the code verification with already published studies (e.g., *Gandomzadeh, 2011; Peyrusse et al., 2014*). This is the first step before studying the Rhone valley's response with the same approach. Finally, in order to see the effect of lateral heterogeneities, we are going to perturb the wave propagation model by adding random spatial variability of soil properties, and analyze their effect on the computed ground motion.



**Sujet de la thèse :****Étude du risque de cardiotoxicité radio-induite précoce chez des patientes traitées par radiothérapie pour un cancer du sein à partir d'une cohorte prospective**

---

Doctorant :	Valentin WALKER
Date du début de la thèse :	02 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSE-SAN, SESANE, Laboratoire d'Epidémiologie
Tuteur de thèse :	Sophie JACOB
Directeur de thèse 1 :	Dominique LAURIER – IRSN
Directeur de thèse 2 :	Jean FERRIERES – INSERM UMR1027 Toulouse
École doctorale :	Université Paris-Saclay / École Doctorale de Santé Publique
Financement de thèse :	projet européen MEDIRAD

---

**Contexte :** La radiothérapie (RT) du sein peut entraîner des effets secondaires au niveau du cœur compte tenu de sa localisation partielle dans le champ d'irradiation. Elle a été associée à un risque accru de pathologies cardiovasculaires plus de 10 ans post-RT. Ces dernières années, la RT a connue des avancées importantes et le cœur est désormais beaucoup moins irradié. Par conséquent, l'identification de marqueurs permettant de détecter les signes précoces de cardiotoxicité et leurs liens avec la dose de rayonnement est cruciale pour améliorer la prévention.

**Objectifs :** Etudier les formes précoces d'atteintes cardiaques en s'appuyant sur des marqueurs d'atteinte cardiaque obtenus par l'imagerie fonctionnelle et anatomique, identifier les biomarqueurs circulants impliqués dans la cardiotoxicité et analyser les doses cardiaques. Un modèle de risque de cardiotoxicité radio-induite combinant tous ces paramètres sera proposé, offrant une approche complète dans l'évaluation du risque chez ces patientes.

**Méthodes :** La thèse s'appuie sur 2 cohortes prospectives de patientes traitées par RT du sein, sans chimiothérapie, âgées de 40 à 75 ans : BACCARAT, cohorte monocentrique française débutée en 2015 incluant une centaine de patientes ; et EARLY-HEART, cohorte multicentrique européenne débutée en 2017 qui devra inclure 250 patientes. Pour les deux cohortes, la déformation myocardique est mesurée par échocardiographies (2D strain) (à l'inclusion avant RT, 6 et 24 mois post-RT). Les anomalies structurelles des artères coronaires sont mesurées à partir de coroscanners (avant RT, RT+24 mois). Pour EARLY HEART, une analyse myocardique plus poussée sera obtenue par des IRM (avant RT, RT+6 et RT+24 mois). Deux panels de biomarqueurs circulants complémentaires sont mesurés à chaque visite. Pour BACCARAT, la dosimétrie cardiaque est faite manuellement en combinant le scanner de RT et le coroscanner. Pour EARLY HEART, elle est automatisée à partir de modèles cardiaques et des scanners de RT.

**Résultats :** Les inclusions de BACCARAT sont terminées depuis décembre 2017, permettant d'inclure 114 patientes. Les données de suivis à 6 mois seront disponibles mi-2018 et feront l'objet d'une première publication d'ici début 2019. Le protocole d'EARLY HEART a fait l'objet d'un article soumis. Les inclusions ont commencé fin 2017.

**Conclusion :** Ces travaux de thèse devraient permettre d'améliorer les connaissances sur la cardiotoxicité précoce induite par la RT du sein, en proposant des résultats sur l'identification et la prédiction des lésions cardiaques radio-induites, sur l'optimisation éventuelles des pratiques de traitement, afin d'améliorer la prévention et la prise en charge des patientes.

**Sujet de la thèse :****Développement d'outils d'aide à l'expertise en spectrométrie gamma**

---

<b>Doctorant :</b>	Jiaxin XU
<b>Date du début de la thèse :</b>	02 / 10 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSE-ENV / SAME / LMRE
<b>Tuteur de thèse :</b>	Anne de VISMES OTT
<b>Directeur de thèse :</b>	Jérôme BOBIN - CEA
<b>École doctorale :</b>	Université Paris-Saclay Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC)
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Dans le cadre de la mission de surveillance radiologique de l'environnement de l'IRSN, le Laboratoire de Métrologie de la Radioactivité dans l'Environnement effectue des mesures d'échantillons prélevés dans l'environnement afin d'identifier et quantifier les radionucléides artificiels.

La radioactivité dans les échantillons de l'environnement est entre autres mesurée par spectrométrie gamma, mesure rapide, non-destructive et multi-élémentaire. Aujourd'hui, l'analyse avec des logiciels commerciaux est limitée, en particulier car elle n'exploite qu'un pic par radionucléide ; elle nécessite également beaucoup de temps et d'expertise.

Dans le cadre de la thèse, nous proposons de nouvelles approches statistiques pour la résolution de problèmes de détection et d'identification par démélange, ainsi que la mise en œuvre de techniques d'apprentissage supervisé pour la détection d'anomalies.

Dans un premier temps, le travail de thèse se concentrera sur le développement de techniques de démélange spectral, c'est-à-dire la séparation en contributions spectrales élémentaires. En effet, le spectre obtenu lors de la mesure d'un échantillon contenant différents radionucléides, est la somme des spectres individuels induits par chaque radionucléide. Ces techniques, fondées sur la modélisation parcimonieuse, permettront de traiter le spectre dans sa globalité (pic et fond continu) et ainsi d'améliorer la sensibilité de la détection.

Dans un second temps, des méthodes d'apprentissage (ex : réseaux neuronaux profonds) seront utilisées pour la classification automatique des spectres, en s'appuyant sur l'expertise acquise au laboratoire et en mettant à profit la base de données du laboratoire contenant plusieurs milliers de couples « spectres de mesure - activité par radionucléide ».

Un travail de bibliographie a été réalisé sur les méthodes existantes pour identifier les spectres gamma et la résolution algorithmique dédiée aux problématiques.

A l'heure actuelle, nous avons implémenté des algorithmes de démélange à partir du modèle mathématique des données avec une modélisation basée sur le processus de Poisson régissant la spectrométrie gamma. Les algorithmes sont testés sur les données simulées à partir des spectres individuels des radionucléides.

La suite de travail consistera à étendre ces algorithmes de démélange afin de : i) permettre l'utilisation de dictionnaires de signatures de grande taille, tout en limitant les effets de sur-ajustement par modélisation parcimonieuse, et ii) prendre en compte la variabilité (ex : imperfection des spectres de référence, variabilité instrumentale) des signatures spectrales dans le dictionnaire.

Les outils développés au cours de la thèse permettront *in fine* d'automatiser l'analyse de spectres simples (ex : aérosols) mais également d'y déceler rapidement des anomalies liées à des incidents ou accidents. Ils seront également une aide pour l'analyse de spectres complexes (ex : NORM) qui nécessitent le plus de temps et d'expertise.



› Salle Charvin

SESSION POSTERS  
Doctorants de 1<sup>ère</sup> année  
Pôle Sûreté Nucléaire

Combustible, Matériaux, Incendie, Méthodes, Aérosols et filtration,  
Facteurs humains et organisationnels

- **Ismail ALJ** - Durabilité des systèmes de mesures réparties par fibres optiques en milieu cimentaire.
- **Abdelattif AMMAR** - Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif de béton sur le développement de réactions de gonflement interne.
- **Aymeric EDELINE** - Étude des pertes de pression monophasiques et diphasiques à travers un Lit de débris 3D imprimé représentatif de La dégradation d'un cœur de réacteur.
- **Alexandre FIGUEIREDO** - Étude expérimentale de la photoréactivité d'iodo-carbones et de particules iodées.
- **Gwenaël HOARAU** - Étude de la limite de détection et des fausses alarmes émises par les balises de surveillance de la contamination atmosphérique dans les chantiers de démantèlement en présence d'aérosols radioactifs.
- **Clément JEANNESSON** - Développement de nouvelles méthodes pour le calcul des sections efficaces dans le domaine des résonances non résolues.
- **Amel KORT** - Développement d'un dispositif métrologique multi-capteurs pour la mesure du dépôt d'aérosols dans un local lors d'un incendie.
- **Maëva LELOIRE** - Étude de matériaux moléculaires de type Metal-Organic Framework pour le piégeage du ruthénium.
- **Joffrey LHONNEUR** - Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons : expérimentations et simulations numériques.
- **Romain MEINIER** - Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu sur un chemin de câbles électriques.
- **Jonathan NUVOLI** - Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules appliquée à la filtration THE.
- **Samuel PEILLON** - Influence des effets électrostatiques liés à la radioactivité sur les forces d'adhésion et sur la mise en suspension de particules.
- **Kathleen PELÉ** - Génération de microstructures équivalentes mécanique à l'aide d'outils statistiques et applications aux études du vieillissement des matériaux cimentaires..
- **Arthur PICHELIN** - Proposition d'un indicateur de durabilité pour la détection des réactions de gonflement interne dans le béton.

**Sujet de la thèse :****Durabilité des systèmes de mesures réparties par fibres optiques  
fixées en parement des structures**

<b>Doctorant :</b>	<b>Ismail ALJ</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>IFSTTAR / MAST et PSN-RES / SEREX / LR2E</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Quentin GRANDO</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Karim BENZARTI – IFSTTAR MAST NAVIER</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Est / Sciences, Ingénierie et Environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN et IFSTTAR</b>

Que ce soit dans une optique de rationalisation des opérations de maintenance, ou pour garantir la sécurité des ouvrages d'art ou des bâtiments de centrales nucléaires, la surveillance des structures de génie civil constitue un enjeu majeur et fait encore l'objet de nombreuses recherches. En particulier, les problématiques de coût, de durabilité des capteurs et de fiabilité des mesures restent des aspects fondamentaux à prendre en compte quel que soit le type d'instrumentation envisagé sur ces structures (capteurs traditionnels ou à fibres optiques).

La technique de mesure de température et de déformations par capteurs à fibres optiques est de plus en plus utilisée pour le suivi des structures en béton armé, en raison des avantages qu'elle offre en termes de précision et de durabilité par rapport aux méthodes d'instrumentation traditionnelles. Les câbles à fibres optiques sont alors soit collés en parement des structures, soit noyés à l'intérieur de la structure en béton. Dans les conditions de service de l'ouvrage, les câbles collés en parement sont exposés à l'environnement climatique extérieur, tandis que ceux insérés dans la structure sont soumis à l'environnement alcalin de la matrice cimentaire.

Par conséquent, l'objectif principal de cette thèse est d'étudier la durabilité des câbles à fibres optiques destinés principalement aux mesures réparties de déformation des structures en béton armé, en s'appuyant sur une sélection de câbles disponibles dans le commerce. L'étude s'appuiera sur un programme expérimental d'essais de vieillissement accéléré sur petites éprouvettes instrumentées, dans des conditions représentatives des applications considérées. Une attention particulière sera portée à l'évolution du mécanisme de transfert d'effort de la structure en béton vers le cœur de la fibre optique au cours des vieillissements. D'un point de vue plus fondamental, la problématique de la décorrélation des mesures de température et de déformation sera également abordée.

En parallèle de cette étude de laboratoire, il est prévu d'instrumenter certains des corps d'épreuve du projet ODOBA de l'IRSN au moyen de câbles à fibres optiques noyés et collés en parement. L'objectif sera de démontrer l'aptitude de cette instrumentation pour la détection et le suivi à long terme des pathologies rencontrées sur les enceintes de centrales nucléaires (réaction sulfatique interne RSI, réaction alcali-granulat RAG et couplage RAG / RSI). Les résultats de cette thèse permettront alors de proposer des critères objectifs de choix pour l'instrumentation des structures de centrales ainsi que des méthodes d'interprétation dans le temps des mesures.



*Instrumentation d'un pont  
avec un capteur à fibre optique  
(Torres et al. 2016)*

**Sujet de la thèse :****Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif de béton  
sur le développement de réactions de gonflement interne**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Abdellatif AMMAR</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SES / BEGC &amp; IFSTTAR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Georges NAHAS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Michel TORRENTI – IFSTTAR</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Paris Est - Sciences, ingénierie et environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La sûreté des ouvrages nucléaires est une préoccupation majeure des pouvoirs publics. Les matrices cimentaires et les bétons sont utilisés comme matériaux de structure et de conditionnement à divers stades de cette industrie. Dans le domaine de la gestion de déchets radioactifs, la radioactivité des déchets de haute, voire moyenne, activité et à vie longue se traduit par l'émission d'une forte puissance thermique. Il en résulte alors un échauffement des matériaux après leur mise en place. Cet échauffement est dénommé « échauffement tardif » par rapport à un échauffement au jeune âge lors de la prise du matériau. Ce phénomène d'échauffement tardif de bétons concerne aussi les piscines de refroidissement des combustibles usagés localisés au sein des centrales nucléaires, mais aussi certaines parties des réacteurs nucléaires comme les puits de cuve et les zones à proximité des traversées vapeur. D'autres cas accidentels sont également concernés, notamment le cas des incendies maîtrisés où l'ouvrage a été réhabilité par la suite.

Cet échauffement pourrait avoir des conséquences néfastes sur la structure. En effet, une montée excessive de température de béton durci est susceptible de générer des modifications de la microstructure des bétons, résultant de processus chimiques, thermiques et hydriques. Il peut alors en résulter des changements significatifs de propriétés mécaniques et de propriétés de transfert. Cet échauffement tardif peut également être accompagné de l'apparition de pathologies de gonflement interne telle que la Réaction Sulfatique Interne. Cette réaction est attribuée à la formation d'ettringite différée qui présente, sous certaines conditions thermodynamiques, des propriétés expansives. Alors que les connaissances acquises auparavant laissaient penser que la formation d'ettringite différée était uniquement due à une montée excessive de la température au jeune âge, les résultats récents, tendent à montrer qu'elle est également susceptible de se former dans le cas d'un échauffement tardif aussi.

L'objectif de la thèse est donc d'acquérir une meilleure connaissance de l'effet d'un échauffement tardif de bétons sur leur durabilité. Les matériaux cimentaires utilisés sont choisis pour être aussi représentatifs de bétons des ouvrages nucléaires. L'influence de la valeur de la température maximale d'échauffement du béton, du profil thermique appliqué et de la nature des constituants du matériau, sera étudiée afin de déterminer leur importance sur le développement des pathologies du gonflement interne. Différentes techniques de caractérisation seront mises en œuvre pour étudier les transformations physico-chimiques et l'évolution de propriétés mécaniques, de propriétés de transfert et le développement de pathologies.

**Sujet de la thèse :****Étude des pertes de pression monophasiques et diphasiques  
à travers un lit de débris 3D imprimé  
représentatif de la dégradation d'un cœur de réacteur**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Aymeric EDELIN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>06 / 11 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEREX / LE2M</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Hervé MUTELLE, Fichot FLORIAN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel QUINTARD – IMFT Toulouse</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Sciences de l'univers de l'environnement et de l'espace SDU2E - Toulouse</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Lors d'un accident grave de réacteur, un lit de débris peut se former dans le cœur. Constitué de fragments de pastilles combustibles et d'éléments de gainage oxydés, il est assimilable à un milieu poreux anisotrope constitué de particules millimétriques hétérogènes.

Ce lit, chauffé par la puissance nucléaire résiduelle, doit être refroidi par injection d'eau (renoyage) pour éviter d'atteindre la fusion des matériaux qui le composent, créant un bain de corium qui s'avère plus difficile voire impossible à refroidir.

Le renoyage de ce lit est nécessaire pour stopper la progression de l'accident mais il peut cependant avoir des conséquences négatives pour la sûreté de l'installation, en particulier s'il provoque une reprise de l'oxydation très exothermique du Zr. Pour améliorer l'évaluation des conséquences du renoyage d'un cœur dégradé, un programme appelé PROGRES est en cours à l'IRSN.

Un des axes de recherche du programme vise à caractériser précisément les pertes de charge pour des écoulements monophasiques ou diphasiques à travers des lits de débris. Ces pertes de charges pilotent en effet l'écoulement à travers ces lits et donc l'efficacité de leur refroidissement.

Un premier travail sur ce sujet a été mené à l'IRSN sur l'installation CALIDE avec des lits modèles constitués de billes ou de particules calibrées. Plus récemment, des lits « numériques » résultant d'un calcul d'effondrement de crayons combustibles ont été réalisés à l'aide d'une méthode granulaire. Cette approche offre l'avantage de travailler avec un lit très réaliste (forme, arrangement et distribution de taille des particules). Elle permet l'obtention d'une image 3D que l'on peut imprimer par prototypage rapide.

L'objectif de ce travail de recherche est d'effectuer des mesures de pertes de charges sur les objets issus ce prototypage et de comparer les résultats obtenus avec des simulations numériques (calculs CFD). Les corrélations ou modèles développés seront également implantés dans le code système ASTEC pour réaliser des calculs réacteur.

La première étape de la thèse consiste à caractériser les objets imprimés afin de préciser l'écart existant entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées de grandeurs clés telles que la porosité. Cela passe par l'identification des bons paramètres d'impression (machine, précision, ...) et par des essais en laboratoire sur les échantillons fabriqués. Pour faciliter ce travail, un lit modèle construit sur la base d'un réseau de pyramide est en cours d'élaboration. Ce lit modèle servira également à faire des calculs à l'aide du code COMSOL et du code CALIF3S développé à l'IRSN.

**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale de la photoréactivité d'iodo-carbones et de particules iodées**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Alexandre FIGUEIREDO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SAG / LETR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Loïc BOSLAND</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Rafal STREKOWSKI &amp; Henri WORTHAM</b> <b>Laboratoire Chimie Environnement</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Aix Marseille Université / Sciences de l'Environnement ED251</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / Région PACA</b>

---

Lors d'un accident survenant sur un réacteur nucléaire, des espèces radioactives, dont des espèces iodées fortement radio-toxiques, peuvent être relâchées depuis l'installation accidentée jusque dans l'atmosphère. Sous l'effet du rayonnement solaire, ces espèces sont décomposées et reformées en fonction des cycles jour-nuit, notamment via des processus d'oxydation. Des modèles permettent de reproduire plus ou moins fidèlement leur comportement. Toutefois, la décomposition des espèces spécifiques organo-oxygéné-iodées n'est pas toujours bien reproduite et nécessite des études cinétiques adaptées pour mieux prédire cette disparition et la potentielle formation de produits secondaires. Ces données consolidées seront in fine introduites dans les modèles cinétiques développés. Enfin, l'interaction de ces espèces gazeuses avec les aérosols environnementaux n'est pas parfaitement connue et pourrait mener à des changements significatifs de comportement de l'iode gazeux, ce qui modifierait de fait les conséquences radiologiques du rejet radioactif.

Dans un premier temps, des études cinétiques en phase homogène seront réalisées dans un réacteur en pyrex simulant les conditions atmosphériques. La détermination des constantes cinétiques de réaction des composées organo-oxygéné-iodés (de différentes familles) avec les radicaux  $O^\circ$  et  $OH^\circ$  sera réalisée sous vide par résonance fluorescence. La génération des radicaux  $O^\circ$  /  $OH^\circ$  se fera par photolyse flash à partir de l'espèce  $O(^3P)$  /  $H_2O$  [Zhang S., Thèse, 2012] afin de simuler les conditions oxydantes. Les produits de réaction seront analysés par spectrométrie de masse couplée à une chromatographie en phase gazeuse.

Pendant la deuxième partie de la thèse, nous nous intéresserons au relâchement de l'iode adsorbé à la surface de particules sous l'influence du rayonnement UV. Un protocole mis au point et validé pour l'étude de la photolyse hétérogène des espèces organiques semi-volatils (Socorro et al., 2015 Atmos Environ, 100, 66-73) sera repris et adapté aux besoins spécifiques de l'étude. L'iode ( $I_2$  et les organo iodés) sera adsorbé sur ces particules par équilibre liquide / solide. Après filtration et évaporation du solvant, les particules iodées seront introduites dans un ballon rotatif et mis sous une lampe UV (Lampe Xénon pour simuler le rayonnement du soleil). A intervalles de temps réguliers, la décroissance de la concentration de l'iode particulaire sera suivie. Les produits de photolyse seront caractérisés via un couplage du réacteur avec un équipement de type PTR-ToF-MS pour l'analyse en ligne de la fraction gazeuse.

Toutes les données obtenues au cours de cette thèse serviront à compléter le modèle de prédiction (ASTEC / SOPHAEROS) de l'évolution des espèces iodées dans l'atmosphère, suite à un accident sur une installation nucléaire.



**Sujet de la thèse :**

**Étude de la limite de détection et des fausses alarmes émises par les balises de surveillance de la contamination atmosphérique dans les chantiers de démantèlement en présence d'aérosols radioactifs**

<b>Doctorant :</b>	<b>Gwenaël HOARAU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>06 / 11 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SCA / LPMA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Grégoire DOUGNIAUX</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Philippe CASSETTE – LNHB CEA</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>EDF-IRSN</b>

---

Dans un contexte de sûreté nucléaire et de surveillance des opérations de démantèlement, il est nécessaire d'améliorer les connaissances sur les performances des balises aérosols utilisées pour la surveillance de la contamination atmosphérique, notamment en présence d'aérosols spécifiques. Les balises mesurent en continu et en temps réel l'activité volumique  $\alpha$  et  $\beta$  dans l'air ambiant et ont généralement pour but d'émettre une alarme sonore et visuelle en cas de dépassement d'un seuil préalablement fixé. Les performances des balises sont évaluées dans des conditions réelles de fonctionnement, conditions décrites dans des référentiels normatifs internationaux. Toutefois, ces derniers ne prennent pas en compte des situations spécifiques, telles que celles rencontrées les chantiers de démantèlement. Or, le retour d'expérience sur ces chantiers montre des déclenchements intempestifs d'alarmes qui retardent les opérations et banalisent le risque.

Les travaux de thèse, en collaboration avec EDF, ont pour but d'étudier le comportement des balises dans des conditions hors référentiels normatifs. Il sera ainsi étudié le rapport bénéfice / risque sur les réglages des balises pour une utilisation dans des atmosphères atypiques (hors référentiels), permettant à la fois d'éviter les fausses alarmes et d'assurer la sécurité des travailleurs. Ces travaux viendront élargir les capacités du banc d'essais ICARE (banc de référence pour la génération d'aérosols radioactifs calibrés en taille et en activité) et permettront de proposer de nouvelles conditions d'essais normatifs et potentiellement d'enrichir les référentiels normatifs de tests des balises.

Les travaux seront menés en trois étapes

- Détermination des facteurs d'influence sur la réponse des balises soumises à une atmosphère typique des chantiers de démantèlement en laboratoire dans un dispositif d'essais nouvellement créé.
- Réalisation de nouvelles campagnes de mesures sur un chantier EDF ciblées sur la mesure des paramètres d'influence identifiés. Des atmosphères représentatives de chantiers de démantèlement seront mises en œuvre en laboratoire, dans le dispositif d'essais.
- Modélisation du comportement d'une balise aérosol en fonction des paramètres d'influence pour compléter l'étude. Cette étape permettra, entre autres, de tester des solutions d'amélioration de la mesure dans des situations atypiques.

**Sujet de la thèse :****Développement de nouvelles méthodes pour le calcul des sections efficaces  
dans le domaine des résonances non résolues**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Clément JEANNESSON</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>29 / 09 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SNC / LNC</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Luiz LEAL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Luiz LEAL - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN-CEA</b>

---

The design of nuclear system requires largely the use of computational tools. The algorithms included are in general based on stochastic and / or determinist solutions of the transport equation, and in any case, final outcomes rely heavily on the nuclear data that describe neutron-matter interactions. Performing independent calculation, in addition to checking the results carried out by others, is part of the IRSN activities. The very first step in the verification procedure is in regarding to the nuclear data used in the calculations. The Évaluation and the processing of nuclear data (translation of the nuclear data from experiments into useful forms for applications) are investigated at IRSN, in the Neutronics Laboratory (LN), where a great deal of effort has been devoted on the development of a nuclear data processing code (GAIA-2). New methods are however required to expand the processing to all energy regions.

The neutron-nuclear interactions are described by cross sections that represent the probability of a reaction to occur. They are functions of the neutron incident energy. At some energies in the epithermal energy range (depending on the target nuclide), neutron-nucleus resonances cannot be experimentally distinguished. This energy domain is called the unresolved resonance range (URR), where parameters from which the cross sections can be derived are only given as averaged values. As a direct consequence, cross sections can only be computed as probability tables at some reference energies across the URR. Moreover, existing methodologies in this range have been developed at times where computer resources were very limited. For instance, a crude approximation of the R-matrix theory (that describes neutron-target interaction) is used: the Single-Level Breit-Wigner formalism. One of the motivations of the PhD work is to use a more rigorous formalism, in order to generate consistent probability tables for use in Monte-Carlo calculations.

A module to compute probability tables in the URR has been developed, that uses a slightly different sampling technique than the one in use in most of the existing software, such as NJOY (LANL) or PREPRO (IAEA). This module has been coupled with the IRSN data processing code, GAIA-2, and its results will be soon tested on benchmarks with the IRSN Monte-Carlo code, MORET5.

**Sujet de la thèse :****Développement d'un dispositif métrologique multi-capteurs pour la mesure du dépôt d'aérosols dans un local lors d'un incendie**

---

<b>Doctorant :</b>	Amel KORT
<b>Date du début de la thèse :</b>	02 / 10 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSN-RES / SCA / LPMA
<b>Tuteur de thèse :</b>	François-Xavier OUF / Jeanne MALET
<b>Directeur de thèse :</b>	Jean-Paul VIRICELLE – École des Mines de Saint-Etienne
<b>École doctorale :</b>	Université de Lyon / ED Sciences, Ingénierie, Santé 488
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / Orano NC

---

La thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme commun avec orano NC sur des feux de mélanges solvants / acide nitrique contaminés par du plutonium et dont l'objectif principal est d'estimer les conséquences d'une telle situation sur le confinement des substances radioactives dans une installation nucléaire de base (INB).

Ce travail se situe dans le cadre de l'étude du dépôt des suies sur les parois du local incendie, indispensable à la prédiction des quantités d'aérosol pouvant être transportés dans les réseaux de ventilation et participant, pour la majeure partie, au colmatage des filtres Très Haute Efficacité. À ce jour, plusieurs paramètres importants tels que la morphologie des suies ou la rugosité des parois ne sont pas pris en compte dans la détermination des fractions déposées lors d'un incendie (Nerisson et al., 2011). De plus, à cause de la complexité des phénomènes incendie rencontrés dans une INB, très peu de données expérimentales, en termes de masse de suies déposées, existent dans la littérature pour juger de la pertinence des modèles de dépôt existants (Gelain et al., 2016).

L'objectif de la thèse est de développer un dispositif multi-capteurs permettant la quantification en temps réel des masses de suies déposées sur les parois d'une INB.

La démarche envisagée consiste dans une première partie, avec le support du LEMAC, à identifier les zones et les mécanismes prépondérants de dépôts de suies à l'aide de modèles de dépôt implémentés dans le code de calcul ANSYS® CFX.

La deuxième partie sera consacrée au développement de préleveurs séquentiels, permettant de déterminer par gravimétrie les ordres de grandeurs des masses déposées, et du dispositif multi-capteurs temps-réel, basé sur le couplage d'un capteur résistif avec un capteur de gaz, exploitant ainsi les quantités de gaz émises pendant la phase de régénération pour mesurer la masse déposée par unité de surface. À ce stade, un état de l'art des différentes technologies des capteurs a été effectué, ainsi que le dimensionnement d'une expérimentation d'analyse thermo-optique *Organic Carbon / Elemental Carbon* permettant d'établir une corrélation entre conductance et masse des suies déposées sur le capteur résistif. Les préleveurs séquentiels ont été conçus et seront mis en œuvre lors des essais incendie PRISME réalisés dans les locaux de DIVA afin d'étudier les effets de différents paramètres (rugosité et porosité des parois, emplacements des cibles...) sur les masses déposées.

La dernière étape de la thèse consistera à valider ce dispositif multi-capteurs lors d'expérimentations analytiques et semi-analytiques.

**Références :**

Gelain, T., Richard, J., & Khanchali, F. (2016). Extension de la validation des modèles de dépôt d'aérosols en conduit et première analyse de sensibilité aux effets de rugosité et de charge électrique. Rapport IRSN\PSN-RES\SCA\2016-08.

Nerisson, P., Simonin, O., Ricciardi, L., Douce, A., & Fazileabasse, J. (2011). *Improved CFD transport and boundary conditions models for low-inertia particles. Computers and Fluids.*

## Sujet de la thèse :

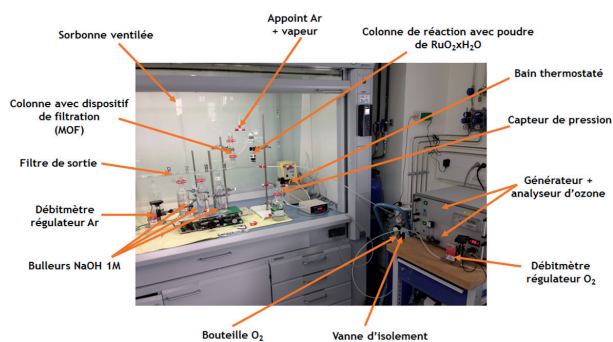
**Étude de matériaux moléculaires de type Metal-Organic Framework  
pour le piégeage du ruthénium**

Doctorant :	Maëva LELOIRE
Date du début de la thèse :	15 / 11 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Thierry LOISEAU, Christophe VOLKRINGER Unité de catalyse et Chimie du solide - Lille
École doctorale :	Université de Lille / Sciences et technologies
Financement de thèse :	IRSN / Région Hauts-de-France

Lors d'un accident grave survenant sur un réacteur à eau pressurisée (REP), les radio-nucléides les plus volatils et radiotoxiques, notamment le ruthénium, sont susceptibles d'être partiellement rejetés dans l'atmosphère. Ainsi, certaines formes chimiques volatiles de produits de fission ne sont pas efficacement piégées par la ligne de dépressurisation de l'enceinte de confinement dite ligne U5 constituée d'un préfiltre métallique et d'un filtre à sable. Au cours de l'année 2017, un flux de Ruthénium  $^{106}$  a été détecté traversant l'Europe d'est en ouest, provenant du sud de l'Oural. Donc au même titre que les autres radionucléides tels que l'iode par exemple, le ruthénium apparaît comme une espèce importante à maîtriser / capturer, en particulier sous forme  $\text{RuO}_4$ , soit pour des possibles rejets lors d'un accident sur un Réacteur à Eau sous Pression (REP) soit dans lors d'un accident sur une installation du cycle du combustible.

Dans cette optique, l'UCCS et l'IRSN ont démarré des travaux de recherche sur des dispositifs innovants de piégeage du  $\text{RuO}_4$ . En effet, depuis plusieurs années sont apparus de nouveaux types d'adsorbants, composés d'entités d'oxydes métalliques et d'une partie organique appelés Metal-Organic Framework (MOF). Ainsi, la présente étude s'intéresse aux éventuelles affinités entre MOFs et  $\text{RuO}_{4(g)}$ , afin d'assurer un piégeage efficace de ce dernier. Il s'agit plus précisément de MOF de type UiO (University of Oslo), composés de briques d'oxyde de zirconium  $[\text{Zr}_6\text{O}_8]$  et de ligands dicarboxylés. Ces matériaux MOF ont l'avantage d'être facile à synthétiser et sont relativement stables. La partie organique peut être modulée par de nombreux paramètres tels que sa longueur, ce qui permet d'agrandir ou rétrécir la taille des pores. Il est possible d'ajouter des groupements réducteurs sur les fonctionnalités du ligand organique, afin de favoriser la capture du  $\text{RuO}_4$  par réduction en  $\text{RuO}_2$ .

Un dispositif générant le ruthénium sous forme de  $\text{RuO}_4$  a été élaboré à l'IRSN au laboratoire L2EC à Cadarache. Les capacités de piégeage du  $\text{RuO}_4$  par les MOFs synthétisés pourront donc être caractérisées sur ce banc d'essais (banc SAFARI). Pour cela, ces MOF seront traversés par un flux de  $\text{RuO}_4$  et la quantité de ruthénium en aval du filtre sera quantifiée par des analyses UV-visible et ICP-AES.



Banc SAFARI de filtration du tétraoxyde de ruthénium

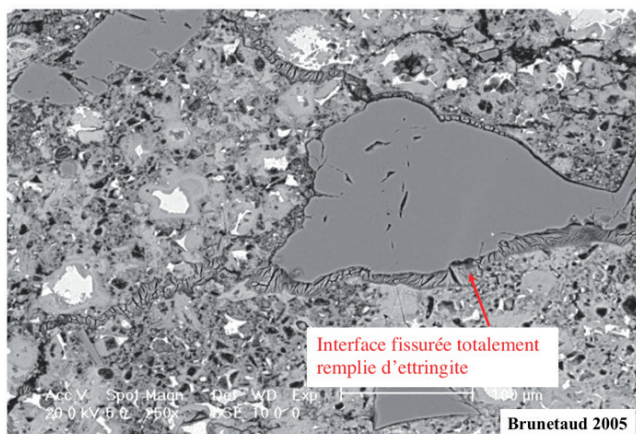
## Sujet de la thèse :

Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons :  
expérimentations et simulations numériques

Doctorant :	Joffrey LHONNEUR
Date du début de la thèse :	21 / 11 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Céline PÉLISSOU
Directeur de thèse :	Said EL YOUSOUFI – LMGC Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier / Information, Structures, Systèmes
Financement de thèse :	IRSN

Les phénomènes limitant la durabilité des ouvrages en béton du génie civil sont nombreux : corrosion des aciers, fatigue, irradiation, évolution microstructurale des matériaux, etc. L'extension de la durée de vie des centrales nucléaires exige de quantifier l'impact de ces évolutions potentielles sur les caractéristiques de leurs enceintes de confinement en béton.

Cette thèse est réalisée dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN / CNRS / UM) qui développe des méthodologies couplant études expérimentales, modélisations multi-échelles du comportement du béton et simulations numériques. Les recherches menées jusqu'à présent ont permis de développer un outil numérique d'études de l'initiation et de la propagation de fissures, ainsi que de multiples phénomènes post-rupture. Cet outil repose sur l'utilisation conjuguée de modèles de zones cohésives et d'éléments finis volumiques. Cette thèse vise à améliorer la compréhension et la simulation des phénomènes de vieillissement des bétons engendrés par certaines pathologies du béton par une étude multi-échelle, allant de l'échelle de l'interface pâte de ciment / granulats (échelle dite locale) à l'échelle de l'éprouvette (échelle dite mésoscopique).



La pathologie du béton étudiée dans cette thèse est la Réaction Sulfatique Interne (RSI). Cette pathologie est due à la croissance de cristaux d'ettringite différée engendrant des gonflements internes qui mènent à l'apparition et à la propagation diffuse de fissures dans le matériau. L'un des objectifs de cette thèse est la compréhension des mécanismes et des conséquences de la RSI à l'échelle locale en vue de mettre en place un outil numérique de prédiction des risques inhérents à ce phénomène.

La démarche envisagée consiste à s'appuyer sur des expériences réalisées au LMGC de Montpellier à l'échelle locale. Ces expériences ont pour but le déclenchement de la pathologie RSI dans l'objectif d'identifier tous les paramètres des modèles de zones cohésives pour un échantillon sain et un échantillon en cours de dégradation par cette pathologie. Les expériences serviront à la proposition de modèles et à leurs validations. Ces modèles seront ensuite implémentés dans les codes de calcul LMGC90 et XPER puis utilisés pour prédire la dégradation à l'échelle mésoscopique.

Enfin, des expériences à l'échelle des éprouvettes serviront à la validation globale de l'outil développé.

**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu  
sur un chemin de câbles électriques**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Romain MEINIER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SA2I/LEF</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Pascal ZAVALETA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Laurent FERRY – C2MA/EMA</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de Montpellier / Sciences Chimiques Balard</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Co-financement par le C2MA/EMA et EDF</b>

---

Environ soixante-dix incendies impliquant des câbles électriques ont été recensés sur les installations nucléaires entre la fin des années 1980 et l'année 2014. Les feux de câbles électriques constituent ainsi l'un des principaux risques d'incendie pouvant affecter la sûreté des centrales nucléaires. Pour évaluer ce risque, les analyses de sûreté incendie doivent s'appuyer sur des outils capables de prédire l'inflammation et la propagation du feu sur des chemins de câbles électriques. L'objectif de la thèse est de proposer des modèles simplifiés d'inflammation et de propagation du feu applicables à des chemins de câbles horizontaux. De tels modèles ont été proposés par la communauté internationale pour des matériaux académiques à petite échelle. Une première étape de la thèse est consacrée à l'étude de ces modèles pour des câbles électriques à petite échelle. La deuxième phase de ces travaux sera dédiée à l'étude des modèles pour un chemin de câbles réel. A cet effet, une étude expérimentale sera réalisée avec le nouveau dispositif expérimental CISCCO (*Cable Ignition and Spreading under Controlled COnditions*) qui permettra de caractériser l'inflammation et la propagation des flammes le long d'un chemin de câble réel soumis à des contraintes thermiques maîtrisées et réalistes.

Les premiers travaux de cette thèse ont donc porté sur l'étude à petite échelle de la loi d'inflammation appliquée à des échantillons de câbles électriques. Les premiers résultats ont permis de montrer la validité de cette loi pour des échantillons de câbles électriques avec retardateur de flamme sans halogène et de diamètre inférieur ou égale à 20 mm. Par contre, cette loi a été mise en défaut pour des échantillons de câbles électriques en polychlorure de vinyle (retardateur de flamme halogéné). En effet, la dégradation de ces derniers a mis en évidence la formation importante d'une couche de « char » (i.e. charbonnement) qui a retardé l'inflammation. Des investigations sont ainsi en cours pour caractériser le volume et la morphologie (par reconstruction 3D) et les propriétés thermophysiques du « char » afin de mieux comprendre son effet sur l'inflammation des câbles. La deuxième partie de cette 1<sup>re</sup> année sera également consacrée au développement d'un banc expérimental pour étudier à petite échelle la loi de propagation pour des échantillons de câbles électriques positionnés horizontalement.



**Sujet de la thèse :****Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules  
appliquée à la filtration THE**

**Doctorant :** Jonathan NUVOLI  
**Date du début de la thèse :** 02 / 10 / 2017  
**Laboratoire :** PSN-RES / SCA / LECEV  
**Tuteur de thèse :** Soleiman BOURROUS  
**Directeur de thèse :** Dominique THOMAS - Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (Nancy)  
**École doctorale :** Université de Lorraine / Ressources, Procédés, Produits, Environnement  
**Financement de thèse :** IRSN

---

La filtration de l'air par des filtres à très haute efficacité (THE) constitue un élément important pour la sécurité des installations sensibles. Pour cette raison, l'IRSN conduit depuis plusieurs années des programmes de recherche sur ces équipements de confinement en vue d'anticiper leur comportement en situation accidentelle, notamment en cas d'incendie. A ce jour, les phénomènes physiques régissant l'efficacité de filtration des médias sont connus et les acquis sont nombreux concernant le colmatage des filtres.

Les récents travaux<sup>(1)</sup> menés à l'IRSN ont conduit à une modélisation phénoménologique du colmatage. Ce modèle confirme, qu'en plus des caractéristiques physiques et géométriques des filtres et de la morphologie et de la taille des particules, la relation entre la masse accumulée et la perte de charge des filtres dépend de la porosité des dépôts formés dans le médium et à sa surface. La porosité du dépôt est de ce fait un élément central de la compréhension et de la modélisation de la filtration des aérosols ; il convient donc d'approfondir les travaux de recherche pour relier la porosité du dépôt aux caractéristiques de l'aérosol<sup>(2)</sup> et aux conditions opératoires de la filtration<sup>(3)</sup>.

Les travaux initiés dans le cadre de cette thèse visent à construire un modèle permettant de prévoir la porosité d'un dépôt en connaissant les propriétés des agrégats et de l'écoulement.

Pour ce faire, des expériences vont être conduites en maîtrisant les caractéristiques des particules produites (à l'aide d'un GFG et d'un CAST) et en formant par filtration des dépôts dont la porosité et la résistance aéraulique seront mesurées. L'objectif de ce travail est de quantifier l'influence de chaque paramètre à partir d'expériences analytiques (en faisant varier les paramètres aérauliques, le médium, les caractéristiques des particules) puis de transposer ces résultats au cas de la filtration THE en prenant en compte les particularités des filtres (géométrie, médium, etc...). Finalement, nous pourrons établir des corrélations ou éprouver les corrélations existantes relatives à la porosité, notamment pour les aérosols de morphologie complexe.

(1) Alitou, Y. (2018). Impact sur le colmatage en régimes permanent et transitoire des écoulements d'air induits par le plissage de médias filtrants THE.

(2) Mädler, L., Lall, A. A., & Friedlander, S. K. (2006). One-step aerosol synthesis of nanoparticle agglomerate films: simulation of film porosity and thickness. *Nanotechnology*.

(3) Thomas, D., Ouf, F. X., Gensdarmes, F., Bourrous, S., & Bouilloux, L. (2014). Pressure drop model for nanostructured deposits. *Separation and Purification Technology*.

**Sujet de la thèse :****Influence des effets électrostatiques liés à la radioactivité sur les forces d'adhésion et sur la mise en suspension de particules**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Samuel PEILLON</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SCA / LPMA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>François GENSDARMES</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Olivier PLUCHERY - INSP et Christian GRISOLIA - CEA</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Sorbonne Université / Physique et chimie des matériaux ED397</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Le dépôt de particules radioactives est apparu depuis plusieurs années comme un enjeu de sûreté important pour le réacteur de fusion ITER. En effet, en conditions de fonctionnement normal, ce réacteur va accumuler quelques centaines de kilogrammes de poussières de tungstène (matériau face au plasma) qui peuvent être radioactives du fait de la présence de tritium et des produits d'activation dans la chambre à vide du réacteur. La mobilité de ces poussières radioactives et leur confinement en cas d'un accident de perte de vide sont un enjeu majeur qui reste difficile à évaluer en particulier dû à un manque de connaissance sur l'évolution des forces d'adhésion entre les dépôts de particules et les surfaces sur lesquelles elles sont déposées.

Or, il a été montré que les particules radioactives peuvent s'auto-charger électriquement, sous l'effet du rayonnement ionisant des radionucléides qu'elles incorporent. En situation d'écoulement aéraulique sur une contamination radioactive, les particules chargées peuvent alors être soumises, en plus des forces de van der Waals, de traînée et de portance, à des forces électrostatiques liées aux conditions environnementales (auto-chargement des particules, développement de champs électriques). Ces forces électrostatiques vont dès lors affecter les propriétés d'adhésion des particules avec la surface. L'étude des forces d'adhésion de particules de tungstène incorporant du tritium sur des surfaces représentatives des PFC (plasma facing components) d'ITER est l'objectif majeur du projet STANDS porté par l'IRSN et le CEA et qui est actuellement financé par le consortium EUROfusion.

Dans ce cadre, la première phase de travail présentée ici propose d'analyser les forces entrant en jeu dans l'adhésion de particules sphériques sur différents types de surfaces. Les modèles existant dans la littérature pour décrire ces forces seront présentés. On exposera également la technique de microscopie à force atomique choisie pour mesurer expérimentalement les principales composantes de la force d'adhésion qui sont : les forces électrostatiques, les forces de van der Waals et les forces capillaires.



**Sujet de la thèse :****Génération de microstructures équivalentes mécanique à l'aide d'outils statistiques  
et applications aux études du vieillissement des matériaux cimentaires**

---

<b>Doctorante :</b>	<b>Kathleen PELÉ</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>16 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA, LMGC et ECM</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric PERALES, Jean BACCOU</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Loïc DARIDON – Laboratoire Mécanique et Génie Civil(LMGC) Jacques LIANDRAT – École Centrale de Marseille (ECM)</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>École doctorale 184 : Informatique et Mathématique de Marseille</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>École Centrale de Marseille et IRSN</b>

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude du vieillissement du béton des enceintes de confinement des centrales nucléaires. Les propriétés thermochimio-mécaniques du béton peuvent en effet évoluer au cours du temps, en particulier si ce béton est le lieu de développement de pathologies, telles que les réactions de gonflement interne. Il est ainsi important d'analyser les conséquences de ces modifications, notamment en termes de fissurations qui peuvent porter atteinte à la fonction de confinement de l'enceinte. Le béton est un matériau très hétérogène (granulats de taille et d'orientation diverses, matrice, porosité) ce qui rend son étude complexe. La répartition des différentes phases du matériau peut être considérée comme aléatoire. Afin de prendre en compte cette variabilité, plusieurs calculs de fissuration sont effectués à partir de microstructures numériques représentatives de la microstructure réelle.

La génération de ces microstructures numériques dites équivalentes s'appuie sur l'utilisation de descripteurs morphologiques qui permettent de contrôler leur représentativité par rapport à une microstructure réelle. Il existe dans la littérature plusieurs descripteurs tels que le covariogramme issu des approches géostatistiques et qui donne des informations sur la répartition des différentes phases au sein du matériau. Toutefois, ce descripteur n'est pas toujours suffisant pour distinguer les différents comportements en termes de fissuration. En effet, certaines études ont montré que deux microstructures ayant le même covariogramme pouvaient présenter des chemins de fissure très différents.

Le premier objectif de la thèse est la construction de nouveaux descripteurs morphologiques plus adaptés au problème de la fissuration mécanique afin de compléter ceux qui sont déjà implémentés dans le logiciel MORCO développé par l'IRSN. Il s'agira ensuite de les intégrer dans la définition d'une mesure de similarité qui permettra de comparer des microstructures entre elles. Enfin, sur la base de cette distance, un algorithme de génération de microstructures numériques équivalentes sera développé.

Le travail actuel porte sur le premier point. Il concerne le développement de nouveaux critères morphologiques intégrant l'orientation des granulats et la distance qui les sépare. En effet, la configuration locale des granulats contrôle le trajet de la fissure. La pertinence des nouveaux critères proposés sera évaluée sur la base d'un ensemble de résultats de simulations du code Xper déjà disponibles correspondant à une microstructure pré-fissurée et soumise à un effort de traction. Cette première étude progressive a pour objectif d'aboutir à la formulation d'un descripteur plus complexe qui combinera les notions de distance et d'orientation et permettra d'avoir des microstructures équivalentes en termes de fissuration.

**Sujet de la thèse :**  
**Proposition d'un indicateur de durabilité**  
**pour la détection des réactions de gonflement interne dans le béton**

<b>Doctorant :</b>	Arthur PICHELIN
<b>Date du début de la thèse :</b>	Oct. 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP / SES / BEGC et LMDC (Insa de Toulouse)
<b>Tuteur de thèse :</b>	Georges NAHAS
<b>Directeur de thèse :</b>	Myriam Carcasses, Insa de Toulouse
<b>École doctorale :</b>	Toulouse - Mécanique, énergétique, génie civil, procédés (MEGEP) - ED468
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

L'objectif de la thèse, en collaboration avec le LMDC (Toulouse) et l'IFSTTAR (Marne la vallée), est de proposer un indicateur de durabilité pour évaluer l'état de développement des pathologies de gonflement interne dans le béton des ouvrages existants. Les réactions de gonflement interne font partie des pathologies du béton. Ces pathologies peuvent être attribuées à deux types de réactions chimiques : la Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alkali-Granulats (RAG). Ces réactions dans leur phase de développement conduisent à la mise en traction du béton et à la création de fissures dans les ouvrages atteints par ces pathologies.

Depuis plusieurs années, l'approche performantielle de la durabilité des bétons se développe en remplacement d'une approche prescriptive : l'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Cependant cette approche concerne essentiellement les pathologies exogènes au béton, il y a un réel intérêt scientifique à utiliser cette approche dans le cas des dégradations de type endogène comme la RAG et la RSI.

Afin de répondre à ces besoins le projet de recherche se décompose en trois parties :

L'étude bibliographique sur les pathologies du gonflement du béton, les indicateurs de durabilité et l'approche performantielle.

La recherche des corrélations entre les évolutions des différents paramètres physiques en fonction de l'état de développement des pathologies.

La proposition d'un indicateur sur la présence des pathologies de gonflement interne dans l'ouvrage et leur état d'évolution.

Différentes techniques de caractérisation seront mises en œuvre pour étudier les transformations physico-chimiques et minéralogiques à l'échelle microscopique : microscopie électronique à balayage, diffractométrie des rayons X, analyses thermiques, analyses chimiques ....

Quant à l'évolution des propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'Young, ...) et des propriétés de transfert, (porosité totale, perméabilité au gaz, diffusivité aux ions,) elles seront étudiées sur des éprouvettes de béton plus représentatives des matériaux (suivant la norme).

Cette thèse s'avère très utile pour l'évaluation de la durée de vie des ouvrages, avec un enjeu sociétal important, et en particulier dans le cadre de la prolongation de durée d'exploitation des réacteurs nucléaires.



## DOCTORANTS NON PRÉSENTS

**Juan BLANCO** - Couplage Neutronique-Thermohydraulique-Thermomécanique pour la modélisation des accidents dans des systèmes nucléaires

**Camille FORTIN** - Modélisation de l'interaction iode-aérosol en atmosphère.

**Hanaa HOUJEIJ** - Étude expérimentale des réactions de capture/désorption des iodures gazeux ( $I_2$ ,  $CH_3I$ ) sur des aérosols environnementaux.

**Nicolas REY** - Effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'athérosclérose : étude des mécanismes adaptatifs immuno-modulateurs.

**Vivian SALINO** - Développement d'une méthode d'optimisation de calculs de cœur REP basée sur une approche d'inversion robuste en total Monte-Carlo. Application à l'évaluation des incertitudes sur les calculs de point chaud dans des configurations perturbées.

**Valentin SCHEIFF** - Ébullition transitoire : modélisation du transfert de chaleur.

**Céline SERRANO** - Étude des troubles cognitifs induits, à l'âge adulte, par l'exposition postnatale du cerveau de souris à des doses faibles ou modérées de rayonnements ionisants : rôle de la neurogénèse et du microenvironnement hippocampique.

**Benjamin TAMPON**, Qualification de la  $\mu$ -TPC du LNE-IRSN comme instrument de référence pour les mesures en énergie et en fluence de champs neutroniques de basses énergies.

**Sujet de la thèse :****Couplage Neutronique-Thermohydraulique-Thermomécanique pour la modélisation des accidents dans des systèmes nucléaires**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Juan BLANCO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SNC / LN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Eric DUMONTEIL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Pablo RUBIOLLO – CNRS / IN2P3 / LPSC</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Grenoble Alpes / Ingénierie Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Lille 1 / IRSN</b>

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de travaux portant sur la mise au point de modèles multi-échelle et multi-physiques pour la simulation des accidents de criticité, menés conjointement par le groupe de Physique des Réacteurs du CNRS / IN2P3 / LPSC et par le Laboratoire de Neutronique de l'IRSN (PSN-EXP / SNC). L'approche multi-physique et multi-échelle a comme fin de produire un modèle numérique prenant en compte tous les phénomènes physiques importants dans les systèmes nucléaires ainsi que leur couplage. Cette approche permet d'améliorer les capacités prédictives des modèles et d'étudier de manière numérique le comportement des composants d'un système nucléaire dans des conditions difficilement réalisables/reproductibles par des expériences (où quand les possibilités d'instrumentation sont réduites). L'approche multi-échelle/multi-physique est donc particulièrement utile pour l'étude des accidents des réacteurs nucléaires ou pour tous les systèmes nucléaires où de très forts couplages existent entre la neutronique, la mécanique et la thermique.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un nouveau schéma numérique de couplage entre SERPENT (code Monte Carlo) et OpenFOAM (code CFD) qui permettra une plus grande flexibilité dans les études en termes de type de transitoires, de systèmes et de phénomènes.

Le travail durant la thèse est articulé autour de trois étapes :

- Dans un premier temps il s'agira de définir un schéma numérique pour le couplage neutronique et thermo-hydraulique, basé sur les codes SERPENT et OpenFOAM. Ce nouveau schéma de couplage devra être suffisamment efficace et robuste pour être adapté à différents types de transitoires. Par exemple, dans l'étude d'un système dont le flux neutronique suit des variations extrêmement rapides (la forme du flux de neutrons prompts ne peut pas être considérée comme étant à l'équilibre), le couplage devra être du type direct. Par contre, dans le cas d'un transitoire plus lent (le flux neutronique peut être considéré comme étant à l'équilibre), la forme du flux sera réévaluée uniquement un nombre limité de fois (approche type quasi-statique) ou le cas échéant une seule fois (approche équivalente à la cinétique ponctuelle). Cette souplesse numérique devrait permettre à l'utilisateur d'adapter le couplage de ces deux codes selon le type d'accident et de système étudié.
- Dans un deuxième temps, l'effort de la thèse sera porté sur le développement des modèles nécessaires à la prise en compte des phénomènes mécaniques qui pourraient se produire.
- Dans la dernière étape, l'efficacité du outil multi-physique basé sur un couplage SERPENT-OpenFOAM et comportant alors un couplage triple (neutronique-thermohydraulique-thermomécanique) sera évaluée à l'aide des données expérimentales et numériques disponibles provenant de divers types de systèmes (milieux liquide, solide, hétérogène).

Sujet de la thèse :

Modélisation de l'interaction iode-aérosol en atmosphère

**Doctorant :** Camille FORTIN  
**Date du début de la thèse :** 01 / 10 / 2015  
**Laboratoire :** PSN-RES / SAG / LETR et laboratoire PC2A (PhysicoChimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère)  
**Tuteur de thèse :** Frédéric COUSIN  
**Directeurs de thèse :** Florent LOUIS-PC2A - Valérie FÈVRE-NOLLET - PC2A  
**Encadrant :** Patrick LEBÈGUE - PC2A  
**École doctorale :** Université Lille 1- Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement  
**Financement de thèse :** Lille 1 / IRSN

Des modèles sont développés par l'IRSN pour prédire les rejets accidentels de radionucléides depuis une installation nucléaire vers l'environnement d'une part et la dispersion de ces radionucléides dans l'environnement d'autre part. Parmi ces radionucléides, une attention toute particulière est portée à l'iode qui contribue majoritairement aux conséquences radiologiques en cas d'accident. Lors de l'accident de Fukushima-Daiichi, un désaccord a été observé entre les concentrations en iode mesurées dans l'environnement et les prédictions des outils de dispersion qui pourrait s'expliquer entre autres par l'absence de modèle de réactivité de l'iode dans l'atmosphère. L'analyse de cette réactivité apparaît essentielle pour l'évaluation des conséquences radiologiques (figure 1).

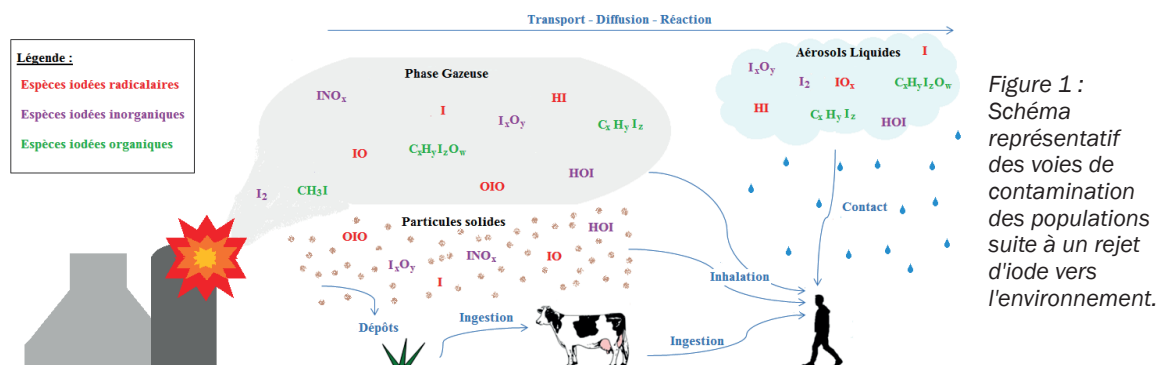


Figure 1 : Schéma représentatif des voies de contamination des populations suite à un rejet d'iode vers l'environnement.

J.Trincal (thèse IRSN 2012-2015) avait mis en évidence la complexité de la réactivité de l'iode dans l'atmosphère en proposant un premier mécanisme réactionnel. L'objectif majeur de la présente thèse est de développer une méthodologie d'analyse et de modélisation de la réactivité de l'iode dans l'atmosphère qui intègre également les interactions entre gaz et aérosols.

Une synthèse des données disponibles dans la littérature concernant les réactions iode-aérosols a été réalisée qui a permis d'identifier différentes voies réactionnelles et qui a mis en évidence des incertitudes sur les paramètres cinétiques. Un nouveau mécanisme réactionnel a été postulé dont les tendances ont été analysées sur l'évolution de la spéciation chimique de l'iode dans un compartiment atmosphérique modèle de composition et de conditions constantes. Le code ASTEC de l'IRSN a été utilisé avec un seul volume pour reproduire des simulations en 0D.

En parallèle une approche par chimie théorique est utilisée pour déterminer les paramètres cinétiques jugés incertains. Ainsi l'étude de la réaction de l'atome d'iode avec le peroxyde d'hydrogène a été réalisée et a donné lieu à une publication (Reactivity of hydrogen Peroxide with Br and I atoms, J. of Physical Chemistry A, 2018,122(4)).

En fin de thèse le comportement de ce mécanisme réactionnel amélioré par ces étapes sera à nouveau testé sur le compartiment atmosphérique modèle puis le mécanisme sera intégré aux modèles standards de chimie-transport Polair3D et Chimère pour des études en conditions réelles appliqués à l'accident de Fukushima-Daiichi.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du laboratoire de recherche commun C<sup>3</sup>R IRSN / CNRS / Lille1.

**Sujet de la thèse :****Experimental study on the capture/desorption of gaseous iodine (I<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>I)  
on environmental aerosols**

**Doctorant :** Hanaa HOUJEIJ  
**Date du début de la thèse :** 01 / 11 / 2017  
**Laboratoire :** PSN-RES / SEREX / L2EC  
**Tuteur de thèse :** Anne-Cécile GREGOIRE / IRSN  
**Directeur de thèse :** Sophie SOBANSKA / Institut des Sciences Moléculaires - Bordeaux  
**École doctorale :** Sciences chimiques ED 40 - Université de Bordeaux  
**Financement de thèse :** IRSN / Région nouvelle aquitaine

---

The reactivity of I<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub>I in the atmosphere has gained much interest in the field of nuclear industry safety as they are key gaseous iodine compounds believed to be released into the troposphere if a severe nuclear power plant accident type Chernobyl (Ukraine) and the more recent Fukushima (Japan) disaster were to occur [1] [2] [3].

Iodine-131 released into the environment is known to have a high radiological impact on human health resulting from different absorption processes that include inhalation and ingestion. However, current post-accident management plans used to protect the public and to minimize the radiological impact of airborne fission products are based only on primary product physical dispersion tools (crisis operational tools), which do not consider any iodine chemical reactivity in the atmosphere. This is worrisome because the atmospheric transport of fission products is modelled without any chemical and photochemical processes that drive different degradation processes within the Earth's atmosphere.

The ability of the nuclear safety field community to accurately characterize the nature and quantities of reactive products that are released into the environment has evolved to the point where detailed comparisons of experimental data with theoretical model studies are limited by the accuracy and availability of rate coefficients for key chemical reactions. For these reasons, new experimental studies of important chemical processes are needed. Such high accuracy data will help and orient the risk management community and government policy makers to take a better political action to better protect the public health if a severe nuclear power plant accident was to occur.

In this context, this work aims at investigating the influence of atmospheric aerosols on the transport of gaseous iodine. The experimental study is focused on the interaction between gaseous iodine (CH<sub>3</sub>I) and sea salt aerosol surrogates in various humidity conditions (RH = 10-80% at ambient temperature) as a preliminary study. The nature of the interaction between gaseous CH<sub>3</sub>I and particles is determined *in situ* by Raman micro spectroscopy and Infrared Spectroscopy (DRIFT) techniques. The methodology as well as first experimental uptake coefficients in controlled conditions close to that encountered in the atmosphere and surface characterization of the particles will be presented.

**Références :**

- [1] Clément B., Cantrel L., Ducros G., Funke F., Herranz L., Rydl A., Weber G., Wren C., State of the art report on iodine chemistry, NEA/CSNI/R(2007)1, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2007, see: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2007/csni-r2007-1.pdf>  
[2] O. Masson et al. Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 7670-7677 ;  
[3] L.S. Lebel et al. Journal of Environmental Radioactivity 151 (2016) 82.

**Sujet de la thèse :****Effet des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'athérosclérose.  
Étude des mécanismes adaptatifs immunomodulateurs**

**Doctorant :** Nicolas REY  
**Date du début de la thèse :** 02 / 03 / 1992  
**Laboratoire :** PSE-SAN / SESANE / LRTOX  
**Tuteur de thèse :** Teni EBRAHIMIAN  
**Directeur de thèse :** Stéphanie LEHOUX – Université McGill  
**École doctorale :** Université paris-11 / Innovation thérapeutique du fondamental à l'appliqué  
**Financement de thèse :** EDF / IRSN

---

Plusieurs accidents nucléaires tels que l'accident de Tchernobyl ou de Fukushima ont conduit à la libération de radionucléides dans notre environnement. Cela a eu pour conséquence d'exposer les populations vivants sur ces territoires contaminés aux rayonnements ionisants, par irradiation externe et / ou par ingestion de produits radiocontaminés à faibles doses chronique. Il est actuellement reconnu que l'exposition aux fortes doses de rayonnements ionisants favorise le développement de pathologies cardiovasculaires, notamment l'athérosclérose, une pathologie inflammatoire qui affecte la paroi vasculaire et entraîne un rétrécissement de la lumière des vaisseaux ce qui peut à terme conduire à une ischémie tissulaire. Cependant les effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'athérosclérose sont moins bien documentés, en partie à cause du manque de puissance statistique des études épidémiologiques dû notamment au grand nombre de facteurs confondants.

Des travaux expérimentaux complémentaires sont donc nécessaires pour permettre une meilleure compréhension des mécanismes impliqués à faibles doses. Cela afin d'assurer, en complément des études épidémiologiques, une meilleure protection des populations.

Plusieurs travaux expérimentaux récents, aussi bien en contamination interne qu'en irradiation externe, à faible dose ont mis en évidence une absence d'effets délétères sur l'athérosclérose. Au contraire, ces expositions se sont traduites par une baisse du profil inflammatoire expliquée en partie par la mise en place d'une réponse radioadaptative à faible dose marquée par une baisse des macrophages des plaques d'athérome (*Le Gallic et al ; Ebrahimian et al ; Vieira Dias et al.*).

L'objectif de cette thèse est l'étude des mécanismes immuno-modulateur mis en jeu lors de l'athérosclérose après exposition à des doses faibles à modérées. Pour cela, dans un premier temps, des modèles de souris ApoE<sup>(-/-)</sup> prédisposées à l'athérosclérose ont été irradiés à des doses allant de 50 mGy à 1Gy à deux débits de doses différents (1,4 mGy.h<sup>-1</sup> et 50 mGy.h<sup>-1</sup>) afin de réaliser un immunophénotypage. Les premiers résultats ont pu démontrer une réduction du nombre de monocytes circulants et de macrophages chez les souris ApoE<sup>(-/-)</sup>, en concordance avec les études précédentes.

Au vu de ces premiers résultats, différentes approches aussi bien *in vivo* et *in vitro* seront mises en place afin d'expliquer cette baisse du profil inflammatoire des plaques d'athérome, après exposition à des doses faibles et modérées, en ciblant la réponse monocyttaire par l'étude :

- I. Des origines de cette monocytose, par l'analyse des populations souches hématopoïétiques à l'origine de leur production.
- II. De la fonction des monocytes après leurs production par leur capacité de « *rolling* », d'arrêt et transmigration sur l'endothélium ainsi que leur polarisation en macrophage M1 et M2.



**Sujet de la thèse :**

**Développement d'une méthode d'optimisation de calculs de cœur REP basée sur une approche d'inversion robuste en total Monte-Carlo. Application à l'évaluation des incertitudes sur les calculs de point chaud dans des configurations perturbées**

<b>Doctorant :</b>	<b>Vivian SALINO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SNC / LN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Eric DUMONTEIL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Eric DUMONTEIL - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Paris Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>

Cette thèse traite des incertitudes et des erreurs commises dans les simulations de neutronique, pour l'étude de la physique des réacteurs nucléaires. En particulier, on s'intéresse, d'une part, aux incertitudes dues aux données nucléaires et, d'autre part, aux erreurs dues aux simplifications de la physique et aux schémas numériques imparfaits. L'objectif de cette thèse est de mettre au point une nouvelle approche des calculs de cœur prenant en compte ces aspects. La méthode originale proposée pour atteindre ces objectifs repose sur les deux points suivants.

a) Les incertitudes dues aux données nucléaires sont évaluées par un échantillonnage aléatoire (tirages « Total Monte-Carlo ») sur les modèles disponibles de données nucléaires. Ces données nucléaires sont multiples (sections efficaces, spectres de fission, données de thermalisation, rendements de fission, énergies dégagées par réaction ...), et par conséquent, la phase d'échantillonnage de ces données est un processus complexe. Leurs incertitudes sont propagées jusqu'aux observables finales.

b) Un algorithme d'optimisation permettra de réduire les erreurs, conditionnellement à l'incertitude. Pour cela, le problème considéré sera résolu avec des méthodes déterministes classiques. Ce même problème est parallèlement résolu sans approximation (équation du transport) avec une méthode Monte-Carlo, avec les mêmes données nucléaires aléatoires obtenues précédemment. L'écart entre ces deux voies est donc uniquement dû à ces deux erreurs. Pour réduire cet écart, on se donnera un jeu de paramètres libres qui feront l'objet d'un algorithme d'optimisation utilisant un métamodèle (par exemple de Krigeage). Cet algorithme devra être robuste aux incertitudes dues aux données nucléaires et multiobjectif par construction, afin de réduire l'écart simultanément sur différentes observables (distribution de puissance, concentration en bore critique, poids des grappes, etc.). L'erreur résiduelle est évaluée et considérée comme non-réductible car restreinte par le choix des paramètres libres.

En termes de résultats, on s'attardera à l'analyse d'une observable pertinente pour l'appréciation des marges de sûreté des cœurs : le facteur de point chaud, c'est-à-dire le maximum de puissance dans le cœur. Toutefois, ces travaux sont effectués de manière généraliste, pour permettre la réutilisation des méthodes développées à d'autres observables (réactivité, rapport d'échauffement critique, coefficients de réactivité...).

On s'intéresse à deux types de configurations :

- 1) Des configurations mesurées, dans des états normaux, qui sont actuellement étudiées, et dont le résultat devrait mener à la consolidation des observations actuelles (fondées sur des écarts entre calculs et mesures).
- 2) Des configurations non-mesurables, en particulier représentatives d'états incidentels ou accidentels.

**Sujet de la thèse :****Ébullition transitoire : modélisation du transfert de chaleur**

---

<b>Doctorant :</b>	Valentin SCHEIFF
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2015
<b>Laboratoire :</b>	PSN / SEMIA / LIMAR & IMFT
<b>Tuteur de thèse :</b>	Pierre RUYER
<b>Directeur de thèse :</b>	Catherine COLIN, Julien SEBILLEAU
<b>École doctorale :</b>	Université de Toulouse - MEGEP
<b>Financement de thèse :</b>	Cofinancement EDF - IRSN

---

Lors d'un hypothétique accident d'insertion de réactivité (RIA en anglais) dans un réacteur nucléaire, une grappe de contrôle est éjectée. Ceci induit un pic de puissance au niveau d'un ensemble de crayons de combustible. Cet emballement local conduit à une forte augmentation de la température de ces crayons, dont la gaine en s'échauffant peut éventuellement subir une ébullition transitoire. Du point de vue de la sûreté, la tenue mécanique de la gaine peut être remise en cause.

Quelques études en conditions réacteurs ont permis d'obtenir des courbes d'ébullition transitoires mais la modélisation de la thermique de la gaine qui en découle manque encore de fiabilité. Les essais intégraux prévus dans le programme international CABRI simuleront le phénomène et apporteront des éléments de validation globale des outils de simulations, mais ils ne permettront pas le développement de modélisation. Ce constat a motivé l'IRSN à entreprendre un programme de recherche. Une expérience modèle a ainsi été construite à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse.

Dans cette expérience, l'écoulement d'un réfrigérant dans un canal de section semi-annulaire, simule l'écoulement autour d'un crayon de combustible. Le demi-cylindre intérieur, composé d'une feuille de métal, est chauffé rapidement par effet Joule, simulant l'échauffement de la gaine.

Une caméra rapide permet de visualiser les régimes d'ébullition. La thermographie infra-rouge permet de mesurer la température de la paroi en métal. L'application d'une peinture noire sur le métal augmente son émissivité mais aussi la résistance thermique de la paroi. Son épaisseur a été réduite au maximum et son influence sur l'estimation de la température du métal côté fluide, qui est la grandeur d'intérêt pour l'étude des transferts de chaleur en ébullition, a été modélisée.

Lorsqu'un film de vapeur se forme et isole la paroi, la température de paroi augmente fortement. Le pilotage initial de l'expérience par un signal de puissance rendait difficile l'étude de ce phénomène. Grâce à un contrôle en température à l'aide d'un P.I.D. (Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur), l'ébullition en film, pendant la chauffe ou le refroidissement de la paroi, a pu être stabilisée expérimentalement.

Les données obtenues permettent désormais de modéliser tous les régimes de l'ébullition transitoire. L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus et leur comparaison avec les tests déjà effectués en conditions de réacteurs nucléaires dans le réacteur japonais NSRR et dans le programme PATRICIA co-financé par l'IRSN, permettent de proposer des modélisations des transferts de chaleur en ébullition transitoire pour le logiciel SCANAIR développé par l'IRSN et utilisé dans les études pour des scénarios accidentels de type RIA.

**Sujet de la thèse :**

**Étude des troubles cognitifs induits, à l'âge adulte, par l'exposition postnatale du cerveau de souris à des doses faibles ou modérées de rayonnements ionisants : rôle de la neurogenèse et du micro-environnement hippocampique**

**Doctorant :** Céline SERRANO  
**Date du début de la thèse :** 09 / 10 / 2017  
**Laboratoire :** PSE-SAN / SESANE / LRTOX  
**Tuteur de thèse :** Christelle DURAND  
**Directeur de thèse :** Philippe LESTAEVEL - IRSN  
**École doctorale :** Paris-Saclay - Innovation Thérapeutique, du fondamental à l'appliqué ED569  
**Financement de thèse :** IRSN

---

Le scanner cérébral chez l'enfant est la procédure de diagnostic médical la plus fréquemment utilisée, mais reste néanmoins un examen dosant. Plusieurs études épidémiologiques suggèrent l'apparition de troubles cognitifs à l'âge adulte à la suite d'une exposition externe aux rayonnements ionisants, pour des doses inférieures à 2 Gy, lors du développement cérébral. Les troubles cognitifs font intervenir des mécanismes d'apprentissage et de mémoire. L'une des principales structures cérébrales qui sous-tend ces mécanismes est l'hippocampe dorsal. Au sein de l'hippocampe se trouve une région appelée gyrus denté, qui est un des lieux majoritaires de neurogenèse adulte. Le processus de neurogenèse fait part des mécanismes nécessaires lors de l'apprentissage et de la mémorisation.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact d'une irradiation postnatale à des doses faibles ou modérées sur le processus de neurogenèse et sur le microenvironnement hippocampique en lien avec l'apparition de troubles cognitifs.

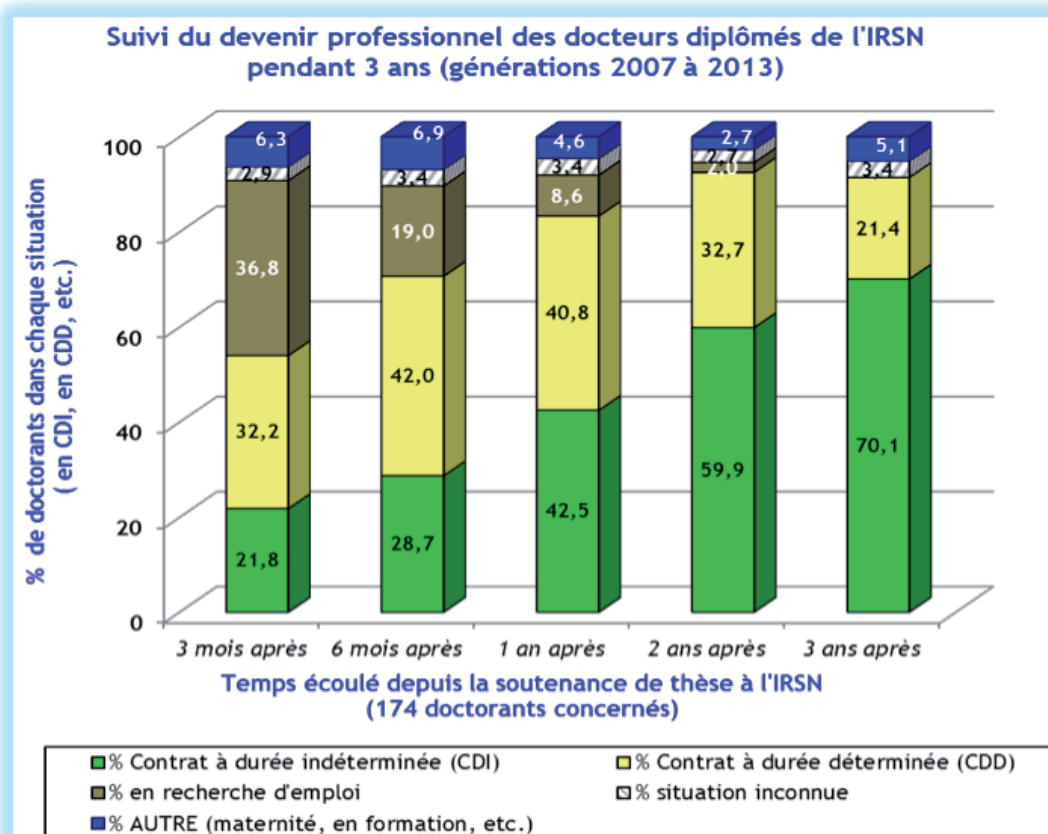
Au sein du laboratoire, des modèles d'irradiation ont été mis en place au SARRP de manière à irradier le cerveau ou le gyrus denté de l'hippocampe dorsal, de souris mâles C57BL / 6. Les irradiations sont effectuées sur des souris âgées de 10 jours, avec une dose unique de 0.25, 0.5, 1 ou 2 Gy. Ces groupes sont comparés à des témoins non irradiés. Pour étudier les effets à long terme de ce type d'irradiation sur l'apparition des troubles cognitifs, un test comportemental nommé piscine de Morris, est effectué 3 mois après exposition. Ce test a pour but d'analyser la capacité d'apprentissage et la mémoire spatiale de souris exposées ou non. Quatre semaines avant le test comportemental, un marqueur de la prolifération cellulaire est injecté par voie intrapéritonéale aux souris afin de suivre la création des nouveaux neurones qui seront réquisitionnés lors de la tâche d'apprentissage. Des expériences d'immunohistochimie permettront de discriminer les différentes populations cellulaires caractéristiques des étapes de la neurogenèse. La prolifération des progéniteurs neuronaux, leur différenciation et leur survie lors de la migration ainsi que leur intégration au réseau préexistant seront ainsi étudiées. Enfin, nous chercherons également à caractériser les possibles modifications des différentes populations cellulaires de leur environnement proche appelé microenvironnement hippocampique.

Cette étude contribuera donc à l'amélioration des connaissances scientifiques sur les conséquences à long terme d'une exposition externe cérébrale postnatale à des doses faibles ou modérées de rayonnements ionisants, avec pour objectif une amélioration de la radioprotection de l'enfant.

## DEVENIR PROFESSIONNEL DES DOCTORANTS DE L'IRSN DE 2009 À 2014 (DOCTEURS GÉNÉRATIONS 2007 À 2013)

Irène SOROKINE-DURM (DSDP/SPS)

Plus d'une centaine de doctorants et de post-doctorants sont présents annuellement à l'IRSN. L'Institut suit le devenir professionnel de ces jeunes chercheurs pendant 3 ans après leur première expérience professionnelle à l'IRSN, c'est-à-dire 3 ans après leur soutenance de thèse (ou fin de post-doctorat). Une enquête annuelle auprès des tuteurs de thèse permet de connaître la situation professionnelle des nouveaux diplômés à diverses périodes (3 mois-, 6 mois-, 1 an-, 2 ans- et 3 ans après leur soutenance de thèse, ou fin de post-doctorat). L'enquête Céreq du ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche montre un taux de chômage de 9-10% au bout de 3 ans pour les docteurs diplômés de 2010. Par contre, le suivi du parcours professionnel des 174 doctorants ayant soutenu leur thèse en 2007-2013 à l'IRSN révèle un taux de chômage quasi nul au bout de 3 ans. De plus, alors que le taux d'emploi à durée déterminée avoisine les 33% à 3 ans (source Céreq), celui des docteurs issus de l'IRSN n'est que de 21,4% avec 70,1% de docteurs en contrat à durée indéterminée (CDI). L'enquête IPDoc 2015 (MESRI-SIES), parue tout dernièrement, montre un taux d'emploi stable à 36 mois similaire (69,2%). Un an après la soutenance de thèse, 86,3% des interrogés de l'enquête expérimentale IPDoc ont trouvé un emploi, les données de l'IRSN sont tout à fait similaires.





# AD'U[N]

## Association des doctorants de l'IRSN

**Bienvenue à l'IRSN !**

Nous sommes l'Adi[N], l'association des doctorants de l'IRSN. Cette association a été créée afin de rendre ton séjour à l'IRSN inoubliable et de t'aider à préparer ton avenir post-IRSN en toute tranquillité (parce que toute bonne chose a une fin...)

→ Afterworks

→ Petit déjeuner

→ Sorties et week-end organisés

→ Formations

→ Aide à la préparation de poster et de communication orale

→ Développement du réseau

→ Cartes de visite

→ Visite de laboratoire

**AD'U[N]**



*Comment nous rejoindre ?*

Pour devenir membre, rien de plus simple ! Il suffit de remplir le formulaire d'inscription sur le site internet de l'association :

[www.adinasso.com](http://www.adinasso.com)  
(L'inscription est gratuite !)

*Tu peux également nous suivre sur les réseaux sociaux*

 Ad'iN

 @adin.asso

 Ad'i[N]

Hi!

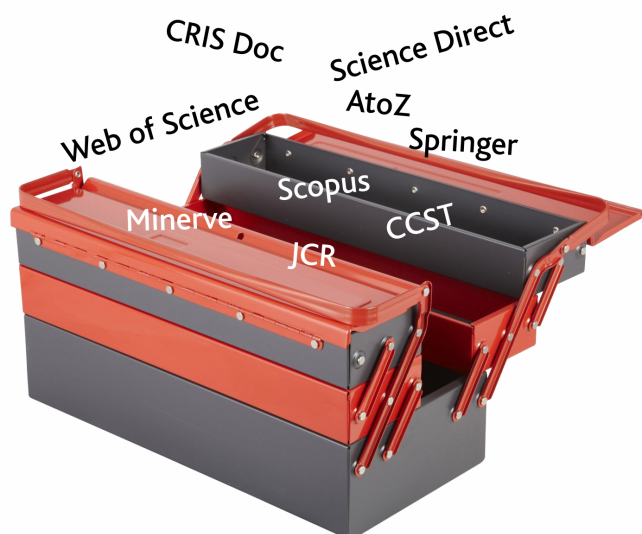
Nous contacter :  [adin.asso.irs@n@gmail.com](mailto:adin.asso.irs@n@gmail.com)  
 01 58 35 87 51

*Notre équipe*



## *Des millions de références en information scientifique et technique !*

Rechercher, commander, veiller, publier



Comment accéder et exploiter les connaissances  
internes et externes dont vous avez besoin  
pour vos projets de recherche ?

Cliquez sur  Bases de données  
scientifiques  
& techniques sur l'intranet de l'IRSN

OU

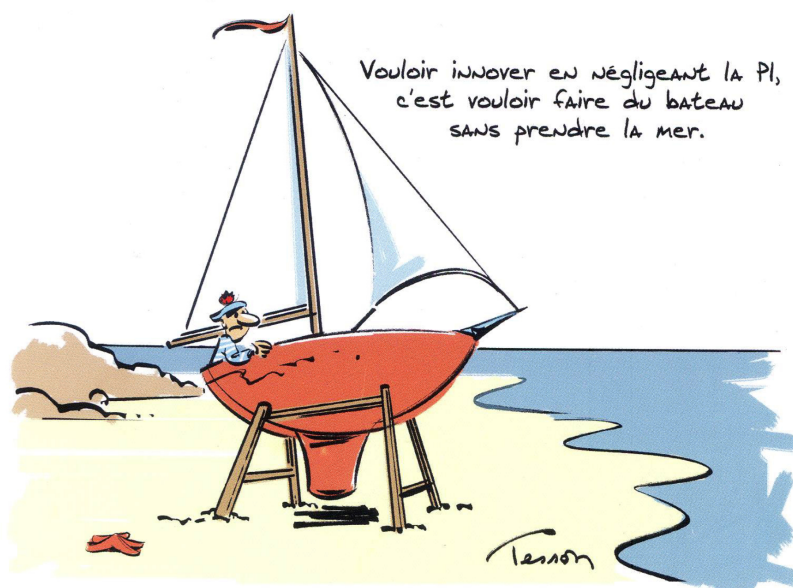
[irsn\\_cris@irsn.fr](mailto:irsn_cris@irsn.fr)

# **1 brevet IRSN sur 3 résultats d'une thèse !**

Vous innovez : créez  
un logiciel,  
un produit,  
un procédé,  
une base de données

...

Pensez à la propriété intellectuelle !



## **Comment protéger vos résultats scientifiques ?**

Contactez : [ipiv@irsn.fr](mailto:ipiv@irsn.fr)



## LISTE DES PARTICIPANTS ET INDEX DES PRÉSENTATIONS

Christelle ADAM	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Ismail ALJ	IRSN/PSN-SEREX/LR2E & IFSTTAR	106
Frederic ALONZO	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Abdelattif AMMAR	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	107
Caroline ARCANJO	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	32
Olivier ARMANT	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Laurent AUDOUIN	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
Marc BABUT	IRSTEA	
Oumar telly BAH	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC	92
Gauzelin BARBIER	IRSN/DSDP/SPS	
Marc BARRACHIN	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Anne-sophie BAYETO	BERTIN Technologies	
Tiffany BEAUMONT	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LEDI	25
Mohamed BELERRAJOUL	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	20
Marion BELLONI	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	93
Amine BEN DAOUED	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	36
Mariam BEN KACEM	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	41
Pierre BENIGNI	CNRS-IM2NP	
Annaïg BERTHO	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	68
Benjamin BLAISOT	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	28
Alexandre BLEYER	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	
Jean-Michel BONNET	IRSN/DSDP	
Alice BONTEMPS	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LRTOX	33
Loïc BOSLAND	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Jean-Francois BOTTOLLIER	IRSN/PSE-SANTE	
Ségolène BOUET-RIVOAL	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	34
Laurent BOUILLOUX	IRSN/PSN-RES/SCA	
Philippe BOURACHOT	IRSN/PSN-RES/SA2I	
Soleiman BOURROUS	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	
Germain BOYER	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
Patrick BOYER	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	
François BRECHIGNAC	IRSN/DG	
Manon BRITEL	IRSN/PSN-SRDS/SHOT/LSHS & INSERM	87
Roberto CARUSO	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	19
Hamza CHAIF	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	94
Thomas CHARTIER	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	37
Rafael CHAVES DEPTULSKI	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	95

Jean-Baptiste CLAVEL	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	
Julien CLEMENT	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	
Olivia COINDREAU	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	
Julie COLNOT	IRSN/PSE-SANTE / SDOS / LDRI	48
Frédéric COPPIN	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	
Catherine COSSONET	IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE	
Anne DE VISMES	IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE	
Alexis DÉPÉE	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	29
Aurélié DESBREE	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LEDI	
Céline DINOCOURT	IRSN/DSDP/SPS	
Gregoire DOUGNIAUX	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
Brigitte DUBOIS	IRSN/DSDP/SPS	
Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC	IRSN/PSE-SANTE/SESUC/BMCA	96
Benoit DURVILLE	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	
Fabien DUVAL	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
Aymeric EDELINE	PSN-RES/SEREX/L2EM	108
Paul EYMÉOUD	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	45
Frederique EYROLLE	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	
Christine FASSERT	IRSN/PSN-SRDS/SHOT/LSHS	
Thomas FERRACCI	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	56
Laureline FEVRIER	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	
Florian FICHOT	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	
Alexandre FIGUEIREDO	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	109
Joëlle FLEUROT	IRSN/PSN-RES/SA2I	
Magali FLORIANI	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Alexandre FLOURET	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	12
Agnès FRANCOIS	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	
Amelie FRÉNEAU	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRAcc	40
Béatrice GAGNAIRE	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Kasi Visweswara Siva Sai GAJAVALLI	PSN-RES/SEREX/SAG/LETR	52
Olivier GANDRILLON	ENS-Lyon	
Laurent GARCIA-SANCHEZ	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	
Jean Christophe GARIEL	IRSN/PSE-SANTE	
Jacqueline GARNIER-LAPLACE	IRSN/PSE-ENV	
Céline GELIS	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	
Mathilde GESTIN	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	73
Rodolphe GILBIN	IRSN/PSE-ENV/SRTE	
Michel GIOT	UCLouvain	
Tony GLANTZ	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	

Richard GONZALEZ	IRSN/PSN-RES	
Ismail Maël GOUMRI	IRSN/PSN-SRDS/SHOT/LSHS	88
Quentin GRANDO	IRSN/PSN-RES/SEREX/LR2E	
Gaëtan GRUEL	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRAcc	
Remi GUÉDON	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	78
Yann GUEGUEN	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LRTOX	
Rodolfo GURRIARAN	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	
Isabelle GUYOT	IRSN/DSDP/SCOSI/BIPE	
Azza HABIBI	IRSN/PSE-ENV/SAME/LERCA	
Yasser HAMDJ	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	
Romain HANOUEZET	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	17
Didier HÉBERT	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC	
Gwenaël HOARAU	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	110
Christelle HUET	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LDRI	
Jacques JABBOUR	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	
Manon JACQUEMIN	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LEDI	24
Cyprien JAILLET	LEYTON	
Vaibhav JAISWAL	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	83
Clément JEANNESSON	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	111
Louis JOËSSEL	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	46
Ekoé KANGNI-FOLI	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	62
Amel KORT	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	112
Patrick LALOI	IRSN/DSDP/SPS	
Maria LANCIERI	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	
Alexia LAPIÈRE	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	69
Eric LASCAR	PSE-ENV/SEREN/LEREN & LHygGes Strasbourg	11
Olivier LAURENT	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	
Ngoc bao tran LE	IRSN/PSE-SANTE/SESUC/BMCA	58
Luiz LEAL	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	
Catherine LECOMTE-PRADINES	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	
Maëva LELOIRE	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	113
Pascal LEMAITRE	IRSN/DSDP	
Nathalie LEMAITRE	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
Flavien LEMOINE	IRSN/PSE-DT/COVAR	
Hugo LEPAGE	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	
Fabrice LEPRIEUR	IRSN/PSE-ENV/SAME/LERCA	
Joffrey LHONNEUR	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	114
Laura LINTIS	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	30
Ludovic MAAS	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	

Arnaud MANGERET	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI	
Olivier MARCHAND	IRSN/PSN-RES/SEMIA	
Denis MARO	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC	
Christophe MARQUIÉ	IRSN/PSN-RES/SEREX	
Laurence MARTINET	IRSN/DSDP/SPS	
Olivier MASSON	IRSN/PSE-ENV/SEREN/LEREN	
Marguerite MATHEY	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	97
Anne MATHIEU	IRSN/PSE-SANTE/SESUC/BMCA	
Romain MEINIER	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	115
Maxime MENSE	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	18
Sylvain MEYLAN	SymAlgo Technologies	
Georges MIKAELIAN	CNRS-IM2NP	
Joachim MISS	IRSN/DSDP/SPS	
Arnaud MONTABERT	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	98
Amandine MOREREAU	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	99
Christian MUN	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Sophia MURAT EL HOUDIGUI	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	79
Georges NAHAS	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	
Shambhavi NANDAN	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	53
Philippe NERISSON	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	
Jean-Christophe NIEL	IRSN/DG	
Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	44
Jonathan NUVOLI	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	116
Pierre-Emmanuel OMS	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC	57
Florian OUVRIER-BUFFET	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	63
Vincent PAGET	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	
François PAQUET	IRSN/PSE-ENV/SRTE	
Samuel PEILLON	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	117
Kathleen PELÉ	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	118
Céline PELISSOU	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Juan david PENA CARRILLO	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	74
Frédéric PERALES	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Arthur PICHELIN	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	119
Emmanuel PORCHERON	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
Laurent POURCELOT	IRSN/PSE-ENV/SEREN/LEREN	
Hugues PRETREL	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	
Oussama RABOUN	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	89
Olivier RADAKOVICH	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	
Ashish RAJYAGURU	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	65

Adithya RAMANATHAN KRISHNAN	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	16
Francois REBIERE	IRSN/PSE-SANTE/SESANE	
Alexandre RIBAUT	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRAcc	70
Fabienne RIBEIRO	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Mathias ROGER	IRSN/PSN-SRDS/SHOT/LSHS	86
Caroline ROUAS	L'ORÉAL	
Emmanuel ROUGE	IRSN/PSN-RES/SEREX/LR2E	
Marine ROULIER	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	10
Véronique ROUYER	IRSN/PSN-RES	
Pierre RUYER	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
Zakari SAADI	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/UEMIS	
Olivier SAUNIER	IRSN/PSE-SANTE/SESUC/BMCA	
Oona SCOTTI	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	
Jianwei SHI	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	75
Marie SIMON-CORNU	IRSN/PSE-ENV/SEREN	
Adrien SOCIÉ	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	64
Irène SOROKINE-DURM	IRSN/DSDP/SPS	
Audrey SOULOUMIAC	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	100
Frédéric SOYSOUVANH	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	42
Lucie STETTEN	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI	13
Christian TAMPONNET	IRSN/DG	
Nicolas TANG	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LDRI	49
Jackie TAV	eLICHENS	
Flomin TCHAWÉ NZIAHA	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	101
Léa TILLARD	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	82
Nicolas TKATCHENKO	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LDRI	26
Samuel VAUX	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
Carmen VILLAGRASA	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LDRI	
Alejandro VILLARREAL LARRAURI	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	54
Pierre-Guy VINCENT	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Valentin WALKER	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	102
Jiaxin XU	IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE	103
Pascal ZAVALETA	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	
Zhenhai ZOU	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	72

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

### **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 / SAG : Service des Accidents Graves

B2EGR : Bureau d'Études et d'Expertises en accident Grave  
et Rejets radioactifs

LEPC : Laboratoire d'Étude de la Physique du Corium

LETR : Laboratoire d'Étude du corium et du Transfert des Radioéléments

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

LECEV : Laboratoire d'Expérimentations en Confinement, Epuration  
et Ventilation

LEMAR : Laboratoire d'études et de modélisation en aérodispersion  
et confinement

LPMA : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

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

LEF : Laboratoire d'Expérimentation des Feux

LIE : Laboratoire de l'Incendie et des Explosions

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

LIMAR : Laboratoire Incertitude et Modélisation des Accidents  
de Refroidissement

LPTM : Laboratoire de Physique et de Thermomécanique des Matériaux

#### **PSN - EXP : Thématique *Expertise de sûreté***

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

LNC : Laboratoire de recherche et de développement en Neutronique  
du Cycle

LNR : Laboratoire de Neutronique des Réacteurs

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

BEGC : Bureau d'Expertise du Génie Civil

#### **PSN - SRDS : Thématique *Systèmes, nouveaux réacteurs et démarches de Sûreté***

PSN - SRDS / SHOT : Service Homme Organisation Technologie

LSHS : Laboratoire de sciences humaines et sociales

**PSE : Pôle Santé Environnement - Direction Santé****PSE - SAN : Thématique Santé**

**PSE - SAN / 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 - SAN / SERAMED** : Service de recherche en radiobiologie et en médecine régénérative

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

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

**PSE - SAN / 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

**PSE - SAN / SESUC** : Service des situations d'urgence et d'organisation de crise

**BMCA** : Bureau de Modélisation des transferts dans l'environnement  
pour l'études 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

**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

**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,  
du développement et des partenariats (DSDP).*





**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

**Siège social**

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

**Site internet**

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

**Référence : DSDP/SPS 2018-00052**