



**HAL**  
open science

## Livret des thèses 2019

Céline Dinocourt, Brigitte Dubois, Véronique Laget

► **To cite this version:**

Céline Dinocourt, Brigitte Dubois, Véronique Laget. Livret des thèses 2019. Journée des thèses, pp.1-154, 2019. irsn-04370522

**HAL Id: irsn-04370522**

**<https://irsn.hal.science/irsn-04370522v1>**

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 1<sup>er</sup> au 4 avril

# Journées des thèses 2019

La Grande-Motte



DIRECTION DE LA STRATÉGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DES PARTENARIATS



**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 2019-00023**

## Gabarit au format pour les couvertures

Coupe : 185 X 265 mm

Dans les paramètres d'impression  
imprimer à 100 %

Adhésif de reliure : symbolisé ici en gris.  
Le positionner sur 10 mm de large  
sur la Première de couverture.

Même s'il "mord" plus au dos du document.

265 mm

10  
mm

185 mm

# Journées des thèses La Grande-Motte, 2019

Rendez-vous au Club Belambra  
"Presqu'île du Ponant"  
Rue S<sup>t</sup> Louis

> > > 1<sup>er</sup> - 4 avril

## Programme

**➤ Lundi 1<sup>er</sup> avril**

12h30 ➤ Déjeuner

**14h20 ➤ ACCUEIL DES DOCTORANTS EN 1<sup>re</sup> ANNÉE**

Place de votre projet dans la recherche à l'IRSN.

Vous avez dit ouverture à la société ?

La formation à l'IRSN.

**14h20 ➤ ACTIVITÉ DE COHÉSION - DOCTORANTS DE 2<sup>e</sup> ET 3<sup>e</sup> ANNÉE**

« Tentative de hackage à l'IRSN : les doctorants sauvent nos données »

19h00 ➤ Apéritif de bienvenue

19h30 ➤ Dîner

20h45 ➤ OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES par Le Directeur général

20h55 ➤ SOIRÉE DÉBAT - **La recherche : et si on y participait ensemble ?****➤ Mardi 2 avril**

08h30 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

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

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

**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.

**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.

**Mariam BEN KACEM** - Intérêt d'implémentation de mesures multiparamétriques  
radio-biologiques pour mieux prédire les risques de complications aux tissus sains  
après radiothérapie.

09h55 ➤ Pause

10h20 ➤ SESSION PARALLÈLE

**Mise en suspension et filtration des polluants**

**Maëva LELOIRE** - Étude de matériaux poreux de type Metal-Organic Framework  
(MOF) pour le piégeage du tétraoxyde de ruthénium (RuO<sub>4</sub>)

**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.

**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 (ICE).

## 10 h 20 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants**

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

**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*.

**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.

## 12 h 15 &gt; Déjeuner

## 13 h 30 &gt; SESSION POSTER

## 14 h 50 &gt; SESSION PLÉNIÈRE

**Propagation du feu**

**Romain MEINIER** - Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu sur un chemin de câbles électriques.

**Jianwei SHI** - Influence of porosity on heat transfers in cable sheaths and cable trays.

## 15 h 40 &gt; SESSION PLÉNIÈRE

**Prise en compte des aléas naturels dans un contexte Post-Fukushima**

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

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

## 16 h 40 &gt; Pause

## 17 h 00 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Évaluation du risque sismique**

**Marguerite MATHEY** - Quantification du champ de déformation 3D des Alpes occidentales et régions périphériques par géodésie spatiale et sismologie - interprétations tectoniques et apports au calcul de l'aléa sismique.

**Flomin TCHAWÉ NZIAHA** - Impact de la variabilité spatiale des propriétés linéaires et non-linéaires du sol sur le mouvement sismique.

**Arnaud MONTABERT** - Characterizing past ground motions from an archaeoseismological approach.

## 17h00 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Comportement du corium en situation d'accident grave**

**Shambhavi NANDAN** - Modelling the evolution of corium, in the vessel lower head, in case of a hypothetical severe accident.

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

19h30 &gt; Dîner

20h45 &gt; Concours - Ma thèse en 3 minutes.

## &gt; Mercredi 3 avril

## 08h30 &gt; SESSION PLÉNIÈRE

**Modélisation des milieux argileux et cimentaires**

**Rafael CHAVES DEPTULSKI** - Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle des pores dans des milieux déformables à l'aide de méthodes particulières (SPH).

**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 les déformations.

**Joffrey LHONNEUR** - Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons : expérimentations et simulations numériques.

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

09h30 &gt; Pause

## 09h50 &gt; SESSION PLÉNIÈRE

**Métrologie et instrumentation**

**Amel KORT** - Développement d'un dispositif métrologique multi-capteurs pour la mesure du dépôt d'aérosols dans un local lors d'un incendie.

**Gwenaél HOARAU** - Étude du comportement d'un moniteur de mesure de la contamination atmosphérique dans des conditions de chantier de démantèlement.

**Jiaxin XU** - Développement d'outils d'aide à l'expertise en spectrométrie *gamma*.

## 10h50 &gt; SESSION POSTER

12h10 &gt; Déjeuner

## 13h50 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Effets radio-induits et traitement**

**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).

**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.

**Annaïg BERTHO** - Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique : modélisation préclinique 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 de cellules stromales mésenchymateuses.

## 13h50 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Endommagement des matériaux**

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

**Kathleen PELÉ** - Analyse géostatistique de microstructures mécaniques et applications aux études de vieillissement des matériaux hétérogènes.

## 15h00 &gt; SESSION PARALLÈLE

**Exposition au faible dose des rayonnements ionisants : des modifications moléculaires aux troubles comportementaux.**

**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 micro-environnement hippocampique.

**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.

**Rémi GUÉDON** - Effets transgénérationnels d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants : de l'épigénome au phénotype.

## 15h00 ► SESSION PARALLÈLE

**Suivi du vieillissement des matériaux cimentaires**

**Arthur PICHELIN** - Proposition d'un indicateur de durabilité pour la détection des réactions de gonflement interne du béton.

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

**Ismail ALJ** - Durabilité des capteurs à fibres optiques destinés à la mesure des déformations des ouvrages en béton.

## 16 h00 ► Pause

## 16h30 ► SESSION PARALLÈLE

**Transfert des radionucléides dans l'environnement**

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

**Audrey SOULOUMIAC** - Étude mécaniste et écophysiological du transfert du carbone 14 aux poissons.

**Hamza CHAIF** - Extraction des paramètres de sorption dans un référentiel de modélisation opérationnel alternatif au Kd : applicabilité des grandeurs définies en milieux contrôlés à des situations réelles.

**Alexandre FLOURET** - Modélisation dynamique de la disponibilité du césium dans le continuum sol-solution-plante : confrontation des modèles disponibles à des jeux de données expérimentaux contrastés.

## 16h30 ► SESSION PARALLÈLE

**Comportement du combustible en situation accidentelle**

**Thomas JAILIN** - Étude expérimentale et modélisation du comportement d'un tube de gainage lors d'un accident de réactivité en phase post-crise ébullition.

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

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

## 19 h30 ► Dîner

## 21 h00 ► Soirée ADi[N], IRSN BEACH.

**➤ Jeudi 4 avril**

09 h 00 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

**Comportement des radionucléides dans l'atmosphère**

**Alexandre FIGUEIREDO** - Étude expérimentale de la photoréactivité d'iodo-carbones et de particules iodées.

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

**Oumar Telly BAH** - Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée.

**Alexis DÉPÉE** - Étude microphysique du lessivage des particules radioactives par les nuages : influence de la charge électrique des aérosols.

10 h 15 ➤ Pause

10 h 40 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

**Dispersion atmosphérique**

**Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC** - Méthodes inverses 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.

**Ngoc Bao Tran LE** - Méta-modélisation et calibration statistique des paramètres d'entrée d'un modèle de dispersion atmosphérique appliqué sur l'accident de Fukushima.

11 h 20 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

**Neutronique**

**Clément JEANNESSON** - Développement de nouvelle méthode de traitement des sections efficaces dans le domaine des résonances non résolues.

**Léa TILLARD** - Étude de l'impact des options de gestion du Plutonium et des Actinides Mineurs.

12 h 00 ➤ CLÔTURE DES JOURNÉES DES THÈSES

12 h 40 ➤ Déjeuner

# Sessions posters et autres informations

Sessions posters Pages 97-130

► Sessions les mardi 2 avril (13 h 30)  
et mercredi 3 avril (10 h 50)

**Pôle Santé Environnement**

Résumés pages 97 à 115

**Pôle Sûreté Nucléaire**

Résumés pages 117 à 130

**Doctorants non présents :** résumés pages 131 à 135

Soirée débat

La recherche : et si on y participait ensemble ? Page 10

Concours : ma thèse en 3 minutes Page 42

Soirée organisation ADi[N], IRSN BEACH. Page 81

Devenir professionnel des doctorants de l'IRSN  
de 2009 à 2016 (docteurs générations 2007 à 2015) Page 136 -137

Présentation de l'ADi[N] Page 138 -139

Informations de l'ASTHEC Page 140 -141

*Le Centre de Ressources en Information Scientifique,*  
l'aide indispensable pour votre veille scientifique Page 142

*Propriété industrielle et brevets,*  
Protéger ses résultats scientifiques Page 143

Liste des participants Pages 144 -148

Liste des services et laboratoires  
d'appartenance des doctorants Pages 149 -150

## ➤ Lundi 1<sup>er</sup> avril

12 h 30 ➤ Déjeuner

14 h 20 Salle Camargue

### ➤ ACCUEIL DES DOCTORANTS EN 1<sup>re</sup> ANNÉE

*Organisé par DSDP et l'Université Interne*

Place de votre projet dans la recherche à l'IRSN.

Vous avez dit ouverture à la société ?

La formation à l'IRSN.

14 h 20 Espace Bar

### ➤ ACTIVITÉ DE COHÉSION DOCTORANTS DE 2<sup>e</sup> ET 3<sup>e</sup> ANNÉE

*Organisée par l'ADi[N] et l'ASTHEC*

«Tentative de hackage a l'IRSN : les doctorants sauvent nos données »

19 h 00 ➤ Apéritif de bienvenue

19 h 30 ➤ Dîner

20 h 45 ➤ OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES

Jean-Christophe NIEL (Directeur général)

20 h 55 ➤ SOIRÉE DÉBAT

La recherche : et si on y participait ensemble ?

➤ **Lundi 1<sup>er</sup> avril**  
à 20 h 55 Salle Les 3 Fontaines

## Soirée débat

### La recherche : et si on y participait ensemble ?

Dans un monde où les réseaux sociaux occupent une place chaque jour plus importante dans nos vies privées et professionnelles et où l'intelligence artificielle s'apprête à transformer profondément nos économies et nos sociétés, quel sera le métier du chercheur de demain ?

Une étude prospective menée il y a quelques années par plus de cinquante jeunes chercheurs des organismes publics français sur le devenir de leur métier à l'horizon 2030 a fait émerger des profils marqués entre autres par des pratiques collaboratives de plus en plus ouvertes et des interactions croissantes entre chercheurs et société civile, en dehors donc du périmètre traditionnel des institutions de recherche.

Plus récemment, l'association Alliss qui a pour objectif le développement de coopérations entre la recherche, l'enseignement supérieur et les organisations de la société civile (associations, collectivités, petites entreprises, syndicats), les politiques de recherche et d'innovation apparaissant comme un moyen privilégié de construire notre futur sur la base de nouvelles connaissances, a publié un livre blanc *Prendre la société de la connaissance au sérieux* qui met en lumière des expériences exemplaires de recherches collaboratives et participatives et la portée des savoirs produits dans ce cadre.

Signe d'un intérêt des pouvoirs publics, le ministère chargé de la recherche a publié une charte des sciences et recherches participatives signée par plus de trente organismes de recherche et d'enseignement supérieurs en 2017. Il n'en reste pas moins que ces modalités de recherche relativement nouvelles pose un certain nombre de questions, autour notamment de l'opérationnalité des savoirs produits ...

S'agit-il d'un marché de niche ou d'une tendance de fond ?  
C'est ce que nous allons essayer de voir.

➤ **Mardi 2 avril**

08 h 30 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

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

**Président : Christophe BADIE**

Senior Scientific Group Leader

Cancer Mechanisms and Biomarkers group / Radiation Effects Department  
Centre for Radiation, Chemical & Environmental Hazards Public Health  
England

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

**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.

**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.

**Mariam BEN KACEM** - Intérêt d'implémentation de mesures  
multiparamétriques radio-biologiques pour mieux prédire les risques  
de complications aux tissus sains après radiothérapie.

**Sujet de la thèse :**

**Analyse psychosociale de la radioprotection dans le domaine médical  
- Perspectives pour l'IRSN**

Doctorant :	Manon BRITEL
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-SRDS / SHOT / LSHS
Tuteur de thèse :	Michel BOURGUIGNON
Directeur de thèse :	Michel BOURGUIGNON – IRSN
Co-directeur de thèse :	Marie PRÉAU - GREPS
École doctorale :	Université Lumière Lyon 2 / ED Education Psychologie Information et Communication
Financement de thèse :	IRSN

**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 sur 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, l'IRSN a décidé de réaliser une recherche en psychologie sociale sur les représentations sociales du nucléaire dans le cas du dépistage du cancer du sein en mammographie.

**Méthodes** - plusieurs recueils de données ont été mis en place.

- Une analyse du discours médiatique grand public, professionnel et institutionnel a été réalisée. L'objectif est d'étudier le contenu de l'information aux différents niveaux concernés.
- Un recueil de données quantitatif auprès de 1 300 femmes représentatives de la population française en France métropolitaine a été réalisé. L'objectif est d'investiguer les représentations du dépistage et la place des RI en mammographie.
- Un recueil de données quantitatives est mis en place auprès des radiologues. 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 que la transmission par les médias grand public des recommandations nationales sur l'âge et la fréquence de dépistage est rigoureuse. Cependant, ce type de médias n'aborde pas la question des RI en mammographie de dépistage. Dans la seconde partie de ce travail, le résultat essentiel est la mise en évidence de comportements de dépistage non justifié chez la femme de moins de 50 ans : parmi les femmes qui ont déjà fait une mammographie, 79,45 % ont réalisé la première mammographie de dépistage avant 50 ans, bien que le dépistage national organisé ne débute qu'à partir de 50 ans. Le 3<sup>e</sup> recueil de données est en cours.

A la suite de l'analyse globale de ces différents recueils de données, nous pourrions synthétiser les éléments importants des représentations psychosociales pour les différents publics concernés par la mammographie de dépistage du cancer du sein et ainsi apporter à l'IRSN des préconisations de radioprotection pertinentes.

**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-SANTE / SESANE / LEPID
Tuteur de thèse :	Sophie JACOB, IRSN
Directeur de thèse :	Dominique LAURIER – IRSN
Co-directeur de thèse :	Jean FERRIERES – INSERM UMR1027 Toulouse
École doctorale :	Université Paris-Saclay / ED Santé Publique
Financement de thèse :	IRSN /MEDIRAD

**Contexte** - La radiothérapie (RT) du cancer du sein a été associée à un sur-risque de pathologies cardiovasculaires  $\pm 10-15$  ans post-RT. Ces dernières années, d'importantes avancées ont permis de réduire l'irradiation cardiovasculaire (y compris les sous-structures). L'identification de signes précoces de la cardiotoxicité et leurs liens avec la dose de rayonnement est nécessaire pour améliorer la prévention.

**Objectifs** - Etudier les formes précoces d'atteintes cardiaques en s'appuyant sur différents marqueurs obtenus par l'imagerie fonctionnelle/anatomique, l'analyse des biomarqueurs circulants et des doses cardiaques impliqués dans la cardiotoxicité.

**Méthodes** - BACCARAT est une cohorte prospective monocentrique incluant 114 patientes traitées par RT du sein, sans chimiothérapie, âgées de 40 à 75 ans et suivies 24 mois. La déformation myocardique est mesurée par échocardiographies (2D-strain) (à l'inclusion pré-RT, 6 et 24 mois post-RT). Les caractéristiques structurelles des artères coronaires sont mesurées à partir de coroscanners (pré-RT, RT+24). Un panel de biomarqueurs circulants est mesuré à chaque visite. La dosimétrie cardiaque a été réalisée individuellement en combinant le scanner de RT et le coroscanner.

**Résultats** - Les inclusions se sont achevées en décembre 2017. Le travail d'évaluation de la dosimétrie cardiaque et d'évaluation de la fonction myocardique 6 mois post-RT a été réalisé. La dose moyenne absorbée au cœur était de 0,61 Gy pour les patientes traitées du côté droit (n=15) et de 3,03 Gy pour le côté gauche (n=89). Pour les seins droits, la coronaire la plus exposée était l'artère coronaire droite (1,46 Gy) tandis que l'interventriculaire antérieure était la plus exposée à gauche (16,56 Gy). La dose moyenne au cœur n'était pas un indicateur suffisant pour estimer la dose aux artères coronaires ( $R^2=0.45$  pour l'IVA). L'analyse de la fonction myocardique a permis de montrer une diminution du strain longitudinale globale 6 mois post-RT pour les patientes ayant reçu une dose supérieur à 3 Gy ( $-14,3\% \pm 4,3\%$  à 6 mois post-RT, contre  $-16,3\% \pm 2,8\%$  pré-RT, changement de 12,3%,  $p=0,0060$ ). Aucun résultat n'était significatif en se limitant aux seins droits. Une relation dose-réponse a pu être observée entre la dose moyenne au cœur et l'altération du GLS d'au moins 10% 6 mois post-RT (OR=1.41, IC95%=[1,06-1,89]).

**Conclusion** - Ces résultats sont en cours de publication. Les données des biomarqueurs seront prochainement analysées. Les données complètes de suivi à 24 mois seront disponibles début 2020. Ces résultats devraient permettre d'améliorer les connaissances sur la cardiotoxicité précoce radio-induite afin d'améliorer la prévention et la prise en charge des patientes.

**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-SANTE / SDOS / LDRI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christelle HUET</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christelle HUET - IRSN</b>
<b>Co-directeur de thèse :</b>	<b>Régine GSCHWIND - Université de Franche Comté</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

Les techniques modernes de radiothérapie externe permettent de délivrer précisément la dose à la tumeur. Ce gain en précision se fait cependant au prix de l'irradiation d'un volume plus important de tissus sains alors susceptibles de développer des lésions radio-induites. Aujourd'hui, les risques de complications représentent un enjeu sociétal important car l'efficacité des traitements permet aux patients une espérance de vie plus longue augmentant ainsi la probabilité d'effets secondaires à moyen et long terme. L'estimation des risques est basée sur les doses délivrées au volume des organes sains qui restent encore méconnues car renseignées de manière incorrecte par les TPS (systèmes de planification de traitement).

Dans ce contexte, le travail de thèse, scindé en deux parties, a pour objectif de déterminer précisément les doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie. La première partie, en collaboration avec le centre Baclesse (Caen), vise à déterminer ces doses par simulation Monte-Carlo lors d'un traitement pulmonaire au Cyberknife. La seconde partie, en collaboration avec l'Institut Curie, consiste en une comparaison expérimentale de deux techniques avancées (Rapid'Arc et Tomothérapie) pour le traitement de tumeurs rénales chez l'enfant.

Tout d'abord, le modèle Monte-Carlo du Cyberknife développé précédemment au laboratoire a été modifié pour l'étendre à la détermination des doses hors-champ. Pour cela, la tête de l'appareil a été complétée par des éléments entourant le faisceau et le transport des particules dans ces éléments a été modifié pour tenir compte des modifications engendrées par les composants non modélisés. Cette simulation a été validée en 1D en comparaison avec des mesures par films radiochromiques et par chambre d'ionisation et a été confrontée au TPS utilisé en routine clinique mettant en évidence les limites de ces systèmes pour évaluer les doses hors-champ (jusqu'à 100% de sous-estimation des doses pour un des algorithmes du TPS). Une validation en 3D et dans des hétérogénéités est en cours.

De plus, un outil expérimental de détermination des doses aux tissus sains a été développé. Ce dernier, permet de reconstruire en 3D les doses mesurées en 2D avec des films radiochromiques placés entre les tranches d'un fantôme. Cette reconstruction par interpolation a été validée en 2D avec des films et en 3D avec des gels dosimétriques. Elle a également été confrontée au TPS.

L'application de ces outils dans l'étude comparative des doses délivrées aux tissus sains est en cours.

**Sujet de la thèse :**

**Intérêt d'implémentation de mesures multiparamétriques radio-biologiques  
pour mieux prédire les risques de complications aux tissus sains après radiothérapie**

<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-SANTE / 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>Sorbonne Université / ED 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 des techniques de radiothérapie qui permettent un meilleur ciblage de la tumeur, la toxicité aux tissus sains reste encore une limite en pratique clinique.

Les mesures d'Efficacité Biologique Relative (EBR) permettent de prédire les effets biologiques d'un rayonnement d'intérêt par rapport à un rayonnement de référence. Elles sont principalement basées sur le test de survie clonogénique qui, selon plusieurs études, ne peut suffire à lui seul à prédire le devenir de tissus sains exposés. Les nouvelles techniques de radiothérapie utilisent des débits de dose de plus en plus élevés sans que les effets radio-biologiques soient bien connus. Il apparaît donc nécessaire de développer des mesures d'EBR multiparamétriques permettant de mieux prédire ces effets biologiques.

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 (HUVECs et HMVEC-L) ont été irradiées à l'aide d'un accélérateur linéaire médical à deux débits de dose (0,6 et 2,5 Gy/min). Outre le test de clonogénicité, différentes mesures biologiques *in vitro* ont été réalisées à différents temps (J3, J7 et J21 post-irradiation). Une modélisation mathématique de ces données est réalisée sur Matlab. Des irradiations localisées de l'anse intestinale sur un modèle préclinique murin ont été menées pour valider les données obtenues *in vitro*.

Les résultats *in vitro* montrent un impact du débit de dose sur la morphologie des HUVECs. Au plus faible débit de dose, la survie clonogénique et la viabilité cellulaire sont supérieures ; et l'activité  $\beta$ -galactosidase (reflet de la sénescence radio-induite) est inférieure. La répartition des cellules dans les phases du cycle cellulaire et l'expression de 44 gènes impliqués dans les processus de sénescence sont également impactés par le débit de dose. *In vivo*, les souris irradiées au niveau de l'anse intestinale extériorisée ont une perte de poids significativement plus importante suite à une irradiation au plus fort débit de dose.

Les données *in vitro* sur les HUVECs montrent un effet plus délétère du débit de dose le plus élevé. La modélisation mathématique de ces données sera consolidée par des mesures similaires réalisées sur les HMVEC-L. Les résultats *in vivo* seront également implémentés dans le modèle.

Pour compléter cette étude, nous nous sommes aussi intéressés aux effets biologiques des irradiations fractionnées *in vitro* (HUVECs) et *in vivo* (irradiations du thorax entier sur un modèle préclinique murin). Ces données sont en cours d'analyse et seront intégrées dans la modélisation.



➤ **Mardi 2 avril**

10h 20 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PARALLÈLE

### **Mise en suspension et filtration des polluants**

**Président : Véronique ROUYER**

Directrice Thématique Recherche en sûreté

**Maëva LELOIRE** - Étude de matériaux poreux de type Metal-Organic Framework (MOF) pour le piégeage du tétraoxyde de ruthénium ( $\text{RuO}_4$ ).

**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.

**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 (ICE).

## Sujet de la thèse :

Étude de matériaux poreux de type Metal-Organic Framework (MOF)  
pour le piégeage du tétraoxyde de ruthénium ( $\text{RuO}_4$ )

Docteurant :	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 - UCCS
Co-directeur de thèse :	Christophe VOLKRINGER - UCCS
École doctorale :	Université de Lille / ED Sciences et technologies
Financement de thèse :	IRSN / Région Hauts-de-France

Lors d'un accident nucléaire grave, différents radionucléides radiotoxiques sont susceptibles d'être rejetés dans l'environnement. Ainsi, certaines formes chimiques volatiles de produits de fission, comme le ruthénium (Ru) sous sa forme gazeuse  $\text{RuO}_{4(g)}$ , ne sont pas efficacement piégées par des filtres usuels type charbon ou filtre métallique. Par ailleurs, au cours de l'année 2017, un flux de  $^{106}\text{Ru}$  a été détecté en Europe, provenant du sud de l'Oural, ce qui traduit la difficulté de confiner le ruthénium gazeux compte tenu de son état métastable.

Afin de prévenir les rejets accidentels de  $\text{RuO}_{4(g)}$  liés aux activités du cycle du combustible ou aux réacteurs de puissance, l'UCCS et l'IRSN ont démarré des travaux de recherche sur des dispositifs innovants de piégeage du  $\text{RuO}_{4(g)}$ . En effet, depuis plusieurs années sont apparus de nouveaux types de matériaux poreux, composés de cations métalliques et d'une partie organique, appelés Metal-Organic Framework (MOF). Les MOFs bénéficient d'un intérêt scientifique fortement croissant ces dernières années. Ce travail de thèse consiste à identifier un MOF ayant des affinités physico-chimiques avec  $\text{RuO}_{4(g)}$ , afin d'assurer un piégeage efficace de ce dernier. Un dispositif générant le ruthénium sous forme de  $\text{RuO}_{4(g)}$  a été élaboré à l'IRSN au laboratoire L2EC à Cadarache (banc SAFARI). Les capacités de piégeage du  $\text{RuO}_{4(g)}$  par des MOFs synthétisés à l'UCCS dans le cadre de la thèse ont été évaluées sur ce banc d'essais. Pour cela, ces MOFs ont été traversés par un flux de  $\text{RuO}_{4(g)}$  et la quantité de ruthénium en aval du filtre est quantifiée par des analyses ICP-AES. Les modifications de structure des matériaux ainsi traités ont été caractérisées à l'aide de différentes techniques, telles que la diffraction des rayons X, l'analyse thermogravimétrique ou la microsonde électronique. Par la suite, un MOF sélectionné pour ses capacités de piégeage sera testé dans des conditions plus sévères (température, humidité relative, oxydes d'azote), afin de se rapprocher des conditions accidentelles.

En parallèle, certains des matériaux poreux de type MOF caractérisés pour le piégeage de  $\text{RuO}_{4(g)}$  ont également été testés pour la capture d'un autre produit de fission susceptible d'être volatilisé durant un accident : l'iode moléculaire  $\text{I}_{2(g)}$ . Le résultat le plus marquant concerne la fonctionnalisation de solides de type MOF par des groupements amino ( $-\text{NH}_2$ ), fonction chimique améliorant nettement la capture de  $\text{I}_{2(g)}$ .

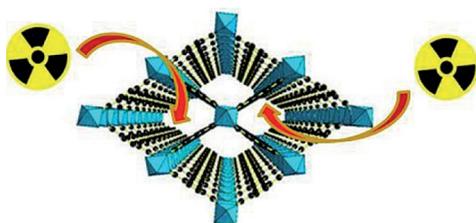


Figure 1: Illustration du piégeage d'espèces radioactives au sein d'un composé poreux de type MOF

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 - LRGP
École doctorale :	Université de Lorraine / SIMPPE
Financement de thèse :	IRSN

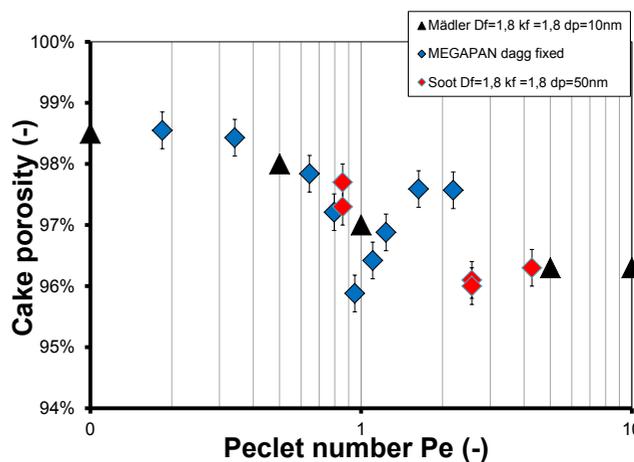
L'un des incidents les plus probables au sein de toute installation industrielle (nucléaire ou non) est l'incendie. L'une des missions de l'IRSN est d'estimer les conséquences d'un tel évènement sur la qualité du confinement des matières radioactives, qui repose en grande partie sur l'utilisation de filtres Très Haute Efficacité (THE). L'importante augmentation de la résistance aéraulique de ces filtres exposés à un aérosol issu d'une combustion constitue l'une des principales causes de défaillance de cet équipement sensible. Ce phénomène est dû à la morphologie complexe des aérosols produits et à leur dimension nanométrique.

Des travaux menés au sein de l'IRSN ont permis de lier les propriétés morphologiques de l'aérosol aux conditions de combustion. En parallèle, une modélisation phénoménologique du colmatage des filtres a été développée<sup>(1)</sup>. L'une des limitations de cette modélisation est l'absence de donnée sur la porosité (la fraction de « vide ») des dépôts formés lors du processus de filtration. Cette grandeur est une donnée fondamentale qui conditionne le processus de colmatage. Elle dépend des conditions d'écoulement, caractérisées par le nombre de Péclet, et de la morphologie des particules.

Les travaux initiés dans le cadre de cette thèse visent à dépasser le caractère empirique des corrélations utilisées à l'heure actuelle<sup>(2)</sup>. Pour ce faire, des expériences analytiques réalisées en laboratoire dans des conditions aérauliques maîtrisées et pour des particules dont les propriétés sont connues (particules sphériques, agrégats) ont été réalisées.

Les mesures réalisées montrent des valeurs de porosité supérieures aux valeurs recensées dans la littérature<sup>(3)</sup> ainsi qu'une dépendance inattendue vis-à-vis de la vitesse de filtration, comme illustré ci-contre.

La poursuite des travaux devra confirmer ces tendances et conduire à une interprétation phénoménologique afin d'envisager sa modélisation. En parallèle, l'exploitation de données expérimentales obtenues sur filtre plissé doit permettre la validation de l'approche pour le cas de filtres plissés réels dans leurs conditions d'utilisation.



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

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

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

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

---

Les réacteurs de fusion nucléaire basés sur le confinement magnétique du plasma et la technologie tokamak produisent des poussières métalliques (béryllium et tungstène) toxiques et/ou radioactives du fait des interactions plasmas/parois au sein de la chambre à vide (Sharpe *et al.*, 2002). En plus d'être un facteur de pollution du plasma, ces poussières posent également des problèmes d'exposition des travailleurs et de sûreté en cas d'ouverture de la machine aussi bien pour des raisons de maintenance qu'en situation accidentelle. Il apparaît ainsi nécessaire de connaître les propriétés d'adhésion et de mise en suspension de ces poussières au cours de la vie de ces réacteurs. Pour cela, l'IRSN conduit depuis plusieurs années des recherches de manière à améliorer les connaissances tant sur le terme source que sur la mise en suspension de ces contaminants (Gensdarmes *et al.*, 2013).

Sur la base de travaux déjà effectués (Peillon *et al.*, 2014 ; Rondeau *et al.*, 2015), je présenterai un nouveau dispositif expérimental permettant de faire des prélèvements de poussières *in-situ* sur les parois de tokamaks existants, mais également de mesurer l'adhésion et la mise en suspension de ces poussières métalliques. Une étude numérique des écoulements d'air dans ce dispositif nommé *DUSTER-BOX* sera présentée en première partie. Je présenterai ensuite l'efficacité de détachement du dispositif sur des particules de tungstène sphériques calibrées en taille. A cette occasion, nous verrons que le protocole expérimental mis en place permet d'étudier plusieurs vitesses de frottement et plusieurs tailles de particules avec une seule configuration d'essai. De plus, la simplicité d'utilisation de ce dispositif ainsi que la bonne répétabilité des mesures rendent possible l'étude de l'adhésion de particules radioactives dans un dispositif expérimental confiné en boîte à gants.

## Références :

- Sharpe, J. P., Petti, D. A. & Bartels, H.-W. (2002). *Fusion Eng. Des.*, 63-64, 153-163.
- Gensdarmes, F., Grisolia, C., Roynette, A., Peillon, S., Gélain, T., Poli, S. and Gargiulo, L. (2013). *Fusion Eng. Des.*, 88, 2684-2687.
- Peillon, S., Roynette, A., Grisolia, C. & Gensdarmes, F. (2014). *Fusion Eng. Des.*, 89, 2789-2796.
- Rondeau, A., Peillon, S., Roynette, A., Sabroux, J.C., Gélain, T., Gensdarmes, F., Rohde, V., Grisolia, C. & Chassefière, E. (2015). *J. Nucl. Mater.*, 463, 873-876.

**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 (ICE)**

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 :	Emmanuel PORCHERON - IRSN
Co-directeur de thèse :	Véronique ROIG – IMFT
École doctorale :	INPT / MeGeP
Financement de thèse :	IRSN

La mise en suspension des poussières dans la chambre à vide d'ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) est un enjeu de sécurité important. L'interaction entre le plasma et les parois conduit à leur érosion, générant de la poussière. L'un des scénarios accidentels est celui d'une fuite du circuit de refroidissement (ICE pour *Ingress of Coolant Event*) qui provoque l'injection et l'atomisation par flash-boiling de l'eau dans la chambre à vide. Le flux de vapeur provenant de la fuite est considéré comme le principal moteur de la mise en suspension de la poussière. La formation et la propagation d'une onde de choc autour du jet liquide flashé peuvent également avoir un impact sur la dynamique de la formation du flux de vapeur. Par conséquent, il est important de caractériser l'écoulement diphasique généré lors de l'ICE afin d'identifier la contribution des principaux phénomènes physiques impliqués dans la mise en suspension des poussières.

Des expériences d'injection d'eau en flash-boiling ont été menées sous vide primaire (1 à 10 mbar) pour étudier les caractéristiques de l'écoulement et la production de vapeur pour différentes températures d'injection (20°C à 140°C) et différents débits. À l'aide de l'ombroscopie et de la PIV à haute vitesse, nous avons obtenu des données qualitatives et quantitatives sur l'écoulement diphasique, telles que la géométrie du jet ainsi que la vitesse des gouttelettes et de la vapeur. Des expériences dans un tube à choc sont également prévues pour étudier la formation et la propagation des ondes de choc dans un milieu diphasique contrôlé sous vide. La mise en suspension d'un dépôt de poussières par le flux de vapeur issu du jet flashé est ensuite étudiée pour des conditions représentatives d'ITER.



Image PIV d'un jet flashé



➤ **Mardi 2 avril**

**10 h 20 Salle Camargue**

## **SESSION PARALLÈLE**

### **Effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants**

**Président : Patrick LALOI**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la Stratégie du Développement et des Partenariats

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

**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*.

**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.

## Sujet de la thèse :

Effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'athérosclérose :  
étude des mécanismes adaptatifs immunomodulateurs

Docteurant :	Nicolas REY
Date du début de la thèse :	02 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESANE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Directeur de thèse :	Stéphanie LEHOUX - Institut McGill
École doctorale :	Université Paris-Saclay / ED Innovation thérapeutique du fondamental à l'appliqué
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Plusieurs accidents nucléaires tels que l'accident de Tchernobyl ou de Fukushima ont conduit à la libération de radionucléides dans l'environnement. Cela a eu pour conséquence d'exposer les populations qui vivent sur ces territoires contaminés aux rayonnements ionisants, par irradiation externe et/ou par ingestion de produits radiocontaminés à faibles doses chroniques. Il est actuellement reconnu que l'exposition aux fortes doses de rayonnements ionisants favorise le développement de l'athérosclérose, une pathologie inflammatoire qui affecte la paroi des gros vaisseaux. Cependant, les effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur l'athérosclérose sont moins bien documentés.

Plusieurs travaux expérimentaux récents, à faible dose de rayonnements ionisants, ont mis en évidence une absence d'effets délétères sur l'athérosclérose. Au contraire, ces expositions se traduisent par une baisse du profil inflammatoire des vaisseaux 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-modulateurs mis en jeu lors de l'athérosclérose après exposition à des doses faibles à modérées.

Ainsi, des études *in vivo* ont été menées après une irradiation aiguë de 50mGy, 500mGy et 1 Gy à des temps précoces (1et 10 jours) et plus tardif (20 Jours) post-irradiation chez des souris C57Bl6 et ApoE(-/-), et ont permis d'observer :

- Une baisse monocyttaire dans le sang circulant à J1 et J10 post irradiation.
- Une hausse de la production de progéniteurs myéloïdes aux temps précoces.
- Une hausse de la quantité de monocytes totaux dans la rate, suggérant un éventuel stockage de monocytes à court terme.
- Une réponse plus marquée chez les souris ApoE(-/-) dont le microenvironnement est plus inflammatoire.

Ces premiers travaux ont permis de privilégier le modèle ApoE(-/-) et l'étude de la voie monocyttaire, fortement impliqué dans l'initiation et la progression de la pathologie athéromateuse, pour la suite des études.

D'autre part, certains éléments relatifs à la transmigration et à la motilité ont également pu être explorés par des méthodes *in vitro*. Il est apparu que pour des temps post-irradiation court la motilité et les capacités transmigrationires des monocytes étaient augmentées.

Pour la suite de la thèse, l'objectif va être de mieux identifier cette réponse monocyttaire aussi bien au temps précoce que tardif post-irradiation.

Pour cela, au temps précoce (J1 et J10), les études vont porter sur : la caractérisation de la **polarisation** des monocytes et des macrophages et l'identification de la **régulation** des monocytes. Puis aux temps long (3 mois), les études porteront sur **l'identification des types monocytaires** intraplaques.

## Références :

Le Gallic, C., Y. Phalente, *et al.* (2015). "Chronic Internal Exposure to Low Dose <sup>137</sup>Cs Induces Positive Impact on the Stability of Atherosclerotic Plaques by Reducing Inflammation in ApoE<sup>-/-</sup> Mice." *PLoS one* 10(6): e0128539.

Ebrahimian, T., L. Beugnies, *et al.* (2017). "Chronic Exposure to External Low-Dose Gamma Radiation Induces an Increase in Anti-inflammatory and Anti-oxidative Parameters Resulting in Atherosclerotic Plaque Size Reduction in ApoE<sup>-/-</sup> Mice." *Radiation research* 189(2): 187-196.

Vieira Dias, J., C. Gloaguen, *et al.* (2018). "Gamma Low-Dose-Rate Ionizing Radiation Stimulates Adaptive Functional and Molecular Response in Human Aortic Endothelial Cells in a Threshold-, Dose-, and Dose Rate -Dependent Manner." *Dose-Response* 16(1): 1559325818755238.

## 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***

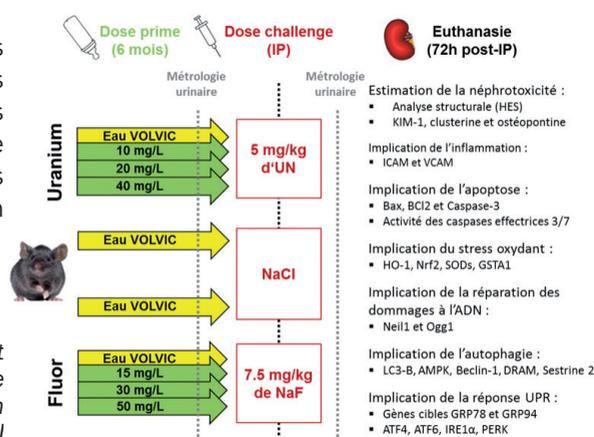
Doctorant : Alice BONTEMPS  
 Date du début de la thèse : 03 / 10 / 2016  
 Laboratoire : PSE-SANTE / SESANE / LRTOX  
 Tuteur de thèse : Yann GUÉGUEN  
 Directeur de thèse : Olivier BARBIER – CINVESTAV Mexique  
 École doctorale : Université Paris-Saclay / ED Innovation thérapeutique, du fondamental 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. Les études menées dernièrement à l'IRSN et au CINVESTAV ont suggéré qu'une telle exposition à l'uranium ou au fluor pouvait entraîner une réponse adaptative au niveau rénal. L'objectif est de mettre en évidence expérimentalement cette réponse adaptative, et d'en identifier les mécanismes moléculaires et voies de signalisation sous-jacentes. Pour ce faire, l'exposition chronique de souris C57BL/6J à de faibles doses « prime » d'uranium ou de fluor est réalisée afin d'observer si cela confère un effet protecteur ou non vis-à-vis d'une dose « challenge » plus forte.

Les études menées dans le premier axe de thèse nous ont permis de déterminer nos conditions « challenge » à l'aide d'analyses biochimiques urinaires et rénales, immuno-histologiques, ainsi que géniques. Les résultats obtenus ont montré que la néphrotoxicité était maximale 72 heures post-injection, et que 5 mg/kg d'uranium et 7.5 mg/kg de fluor induisaient une néphrotoxicité modérée, sans pour autant être irréversible.

Le second axe de thèse a donc été réalisé tel que décrit par la figure ci-dessous. Les analyses réalisées jusqu'à présent montrent la mise en place d'une éventuelle réponse adaptative au niveau rénal *via* les dosages urinaires des marqueurs de néphrotoxicité clusterine et KIM-1. Ils ont révélé une diminution de la néphrotoxicité à 15 mg/L et 50 mg/L de fluor, respectivement. L'évaluation des paramètres de néphrotoxicité au niveau génique est en accord avec une diminution de la néphrotoxicité à 50 mg/L de fluor, confirmant les résultats des dosages urinaires de KIM-1. A contrario, aucune atteinte histopathologique n'est observée par coloration HES. Dans le cas de l'uranium, on observe une diminution de l'expression génique de clusterine, KIM-1 et ostéopontine à 20 mg/L. L'étude des voies de signalisation impliquées dans la réponse adaptative montre que l'autophagie et l'inflammation pourraient être impliquées lors d'un traitement chronique au fluor ou à l'uranium. Les études immuno-histologiques ciblées sont actuellement en cours afin de confirmer/infirmier cette hypothèse.

La réponse adaptative est l'une des hypothèses permettant d'expliquer les effets non-linéaires à faible dose. L'identification des mécanismes biologiques impliqués devrait permettre d'améliorer l'évaluation des risques sanitaires d'exposition chronique lors d'une contamination interne par des radionucléides.



*Protocole expérimental permettant de mettre en évidence une réponse adaptative au niveau rénal après exposition à l'uranium ou au fluor chez la souris C57BL/6J*

**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 cycle du combustible nucléaire**

**Doctorant :** Marion BELLONI  
**Date du début de la thèse :** 04 / 12 / 2017  
**Laboratoire :** PSE-SANTE / SESANE / LEPID  
**Tuteur de thèse :** Sophie ANCELET  
**Directeur de thèse :** Chantal GUIHENNEUC - Université Paris-Descartes  
**École doctorale :** Université Paris-Saclay / ED Santé Publique  
**Financement de thèse :** IRSN / ORANO

---

Les effets sanitaires potentiellement induits par des expositions professionnelles multiples aux rayonnements ionisants et aux agents chimiques sont peu étudiés et donc peu connus. L'impact sanitaire de chaque source d'exposition est généralement évalué séparément dans les analyses épidémiologiques. Il est donc légitime de se demander dans quelle mesure une absence d'effet cancérigène notable à faible dose et débit de dose pour une exposition spécifique reste vraie dans une situation de co-exposition. Deux 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 pouvant mener à des estimations de risque biaisées et à une déformation des relations dose-réponse, si non ou mal prises en compte.

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

Le premier axe concerne l'estimation du risque de décès par cancer du poumon dans la cohorte des mineurs d'uranium français qui sont soumis simultanément à une contamination interne aux gaz radon et aux poussières d'uranium ainsi qu'à une exposition externe aux rayonnements gamma. Une analyse descriptive des données d'exposition de la cohorte a été réalisée. Plusieurs modèles hiérarchiques bayésiens ont été ajustés pour tenir compte des erreurs de mesure sur l'exposition aux rayonnements gamma et des données d'exposition manquantes ou sous seuil de détection du dosimètre dans l'estimation du risque de décès par cancer du poumon associé à cette seule source d'exposition (le cas de l'exposition au radon a été traité dans une précédente thèse). Ce premier travail a permis de tester la robustesse des résultats courants ne tenant pas compte de ces sources d'incertitude.

Une revue bibliographique des différentes approches statistiques en cas de multi-colinéarité a été réalisée. La méthode retenue, dite de régression sur profils d'exposition, permet d'identifier et de caractériser des groupes de mineurs ayant un profil d'exposition proche et d'estimer le risque de décès par cancer du poumon associé au groupe. Le modèle implémenté doit être amélioré pour prendre en compte le statut tabagique, les erreurs de mesure et l'évolution temporelle des expositions. Un autre algorithme d'inférence bayésienne est à implémenter afin d'accélérer les calculs. Les prédictions individualisées de risque doivent être calculées. Enfin, des simulations sont nécessaires pour valider la méthode.

➤ Mardi 2 avril

SESSION POSTER à 13 h 30 Salle Mistral

SESSION PLÉNIÈRE à 14 h 50 Salle Les 3 Fontaines

**Propagation du feu**

**Président : Joachim MISS**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Romain MEINIER** - Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu sur un chemin de câbles électriques.

**Jianwei SHI** - Influence of porosity on heat transfers in cable sheaths and cable trays .

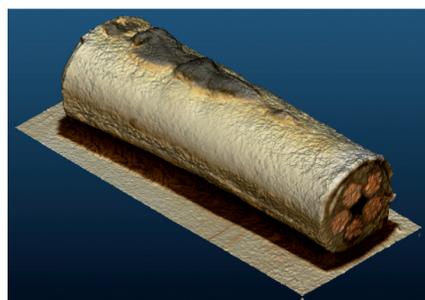
**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu  
sur un chemin de câbles électriques**

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

Environ soixante-dix incendies impliquant des câbles électriques ont été recensés depuis 1990 sur les installations nucléaires de douze pays membres de l'OCDE. Pour évaluer les conséquences de ces feux, 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 pour des chemins de câbles horizontaux. De tels modèles ont été proposés par la communauté internationale pour des matériaux académiques et de petite taille.

Une première étape de la thèse est consacrée à l'étude de l'inflammation pour des échantillons de câbles électriques utilisés sur les installations nucléaires. Deux types de câbles électriques ont été testés sous cône calorimètre pour déterminer le délai d'inflammation en fonction de l'irradiance. Le premier type de câble contient un retardateur de flamme sans halogène (alumine trihydratée ou ATH) tandis que le second type est fait avec du polychlorure de vinyle (PVC). Les mesures du délai d'inflammation ont été comparées à celles calculées par le modèle de Rhodes et Quintiere<sup>[1]</sup>. On constate un accord acceptable entre le modèle et les mesures pour les câbles avec ATH. Par contre, une différence notable a été constatée pour les câbles avec PVC, due au charbonnement se produisant avant inflammation. Afin de caractériser ce charbonnement, des essais ont été menés sous cône calorimètre et arrêtés à différent instants avant inflammation. Les charbonnements formés ont été reconstruits en un maillage 3D par photogrammétrie pour estimer leur volume. De plus, des propriétés thermophysiques et morphologiques du charbonnement ont également été déterminées. Une correction du modèle d'inflammation de Rhodes et Quintiere, tenant compte de l'effet du charbonnement, a été finalement proposée.

La deuxième phase de ces travaux de thèse sera dédiée à l'étude de l'inflammation et de la propagation du feu sur un chemin de câbles électriques à l'aide du nouveau dispositif CISCCO (*Cable Ignition and Spreading under Controlled COnditions*). Ce dispositif est équipé de panneaux rayonnants qui permettront d'imposer sur le chemin de câbles étudié des flux thermiques maîtrisés et réalistes.



[1] B. T. Rhodes and J. G. Quintiere, "Burning Rate and Flame Heat Flux for PMMA in a Cone Calorimeter," Fire Safety Journal, pp. 221-240, 1996.

**Sujet de la thèse :****Influence of porosity on heat transfers in cable sheaths and cable trays**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Jianwei SHI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>31 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA21 / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Germain BOYER</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-François THOVERT- Institut Pprime</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Poitiers / Institut Pprime</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Fire spreading along cable trays in Nuclear Power Plants (NPP) has been widely studied in large scale facilities. Yet, the cable sheath material and pyrolysis residual thermal and thermokinetic properties (i.e. related to their degradation) have been identified as influent factors on the fire spreading, with significant differences between halogenated (e.g. PVC) and non-halogenated (e.g. PE/EVA compounds filled with mineral fire-retardants) sheaths. Thus, given its strong influence on the temperature rise in the virgin part of the pyrolyzing material, the present work aims at enhancing the modelling of the thermal conductivity of these materials and their residues, so as to predict their whole thermal degradation. This approach mainly consists in three steps:

1. Build 3D representations of the degraded polymers at the most significant steps of its pyrolysis.
2. Evaluate the effective thermal conductivities of the degraded polymers at each step.
3. Use these effective conductivities in the complete simulation of the material pyrolysis.

The residues of PE/EVA/ATH and PVC cable sheaths already tested in large-scale facilities exhibit different morphologies: the PE/EVA/ATH compounds and their residuals have a microporous structure due to the presence of the initial mineral load of ATH (alumina trihydrate) contained in the polymer matrix; conversely, the PVC leads to the formation of an intumescent residue containing large pores visible to the naked eye. Therefore, this thesis aims at proposing a predictive effective conductivity model which accounts for the evolution of the morphology of these materials during their degradation and the local material conductivity. For this purpose, volume homogenization methods are used either on tomography, which allows an exact consideration of their morphology, or on synthetic models defined from SEM (Scanning Electron Microscope) observations.

Preliminary simulations of reference cone calorimeter experiments carried out on PVC and EVA/ATH samples are performed. Seemingly, the porous residual morphology has a strong influence on the material effective conductivity by the means of the radiative effects when the medium pore size is large as observed for PVC. Here, the radiative transfer can be modelled by the Rosseland approximation which provides a radiative conductivity included in the thermal diffusion. Conversely, non-intumescent PE/EVA/ATH compounds induce highly conductive mineral residuals with limited radiative effects. In this case, the pure thermal conductivity is assessed by applying a homogeneization technique on the 3D representation of the porous media at different stages of the degradation, and is then tested in pyrolysis simulations to be compared to cone calorimeter experiments involving these materials.



➤ **Mardi 2 avril**

15 h 40 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Prise en compte des aléas naturels dans un contexte Post-Fukushima**

**Président : Sylvain DAVID**  
Chargé de recherche CNRS  
Institut de physique nucléaire d'Orsay

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

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

**Sujet de la thèse :**

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

---

<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>École doctorale :</b>	<b>Université Paris V / ED Sciences Humaines et Sociales</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / AGORAS</b>

---

La thèse s'inscrit dans le programme RSNR AGORAS (Amélioration de la GOuvernance et des Réseaux d'Acteurs pour la Sûreté nucléaire). Elle étudie les évolutions dans la gestion de la sûreté nucléaire permises par le contexte faisant suite à un accident nucléaire majeur, en l'occurrence celui associé aux Evaluations complémentaires de surété (ECS) post-Fukushima. La présente thèse s'attache à étudier un objet technique particulier, à savoir la prise en compte du risque sismique.

Pour répondre à cette problématique, le parti pris de la thèse a été de replacer les événements faisant suite à l'accident dans une dynamique diachronique. L'ambition était de revenir sur la construction et le maintien de la sûreté aux différentes étapes du programme électronucléaire : la conception des centrales, la stabilisation d'un corpus réglementaire, les réexamens de sûreté successifs et finalement la période faisant suite à l'accident japonais. Afin d'étudier la sûreté face aux phénomènes sismiques, la focale a été portée sur la notion de marge de sûreté. Se situant à l'intervalle entre la définition des aléas et la détermination de la robustesse des installations, étudier la marge de sûreté a permis d'analyser l'évolution de la sûreté de façon pragmatique.

Un des premiers résultats de la thèse est de constater que la marge de sûreté recouvre des réalités diverses et compose un espace multiforme et évolutif. Qu'il s'agisse de coefficient de sécurité, de marge de conception, de provision ou de conservatisme, la marge de sûreté existe sous différentes formes, pouvant parfois s'additionner, mais étant le plus souvent incommensurables, rendant la détermination d'une marge d'ensemble incertaine. Un deuxième apport est de revenir sur les mutations du rôle de la marge de sûreté. Lors de la conception, elle est utilisée comme une « monnaie » dans un espace d'échange visant à la réalisation effective et sûre de la centrale dans un champ de contraintes. Elle permet en effet la collaboration de plusieurs communautés épistémiques hétérogènes en créant un espace de commensurabilité. Pendant l'exploitation de la centrale, la marge de sûreté est mobilisée pour maintenir une cohérence entre des niveaux d'aléas fluctuant au gré de l'évolution des connaissances et une résistance réelle de l'installation que le retour d'expérience contribue à préciser chaque jour un peu plus. Enfin, dans la période qui fait suite à l'accident de Fukushima, la marge de sûreté a été l'objet d'une re-conceptualisation, délaissant sa seule vocation de garante de sûreté pour devenir un levier d'action.

**Sujet de la thèse :**

**Modélisation de la sismicité sur les failles dans un calcul probabiliste de l'aléa sismique**

<b>Doctorant :</b>	<b>Thomas CHARTIER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SCAN / BERSSIN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Oona SCOTTI</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Hélène LYON-CAEN – ENS</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>ENS-IPGP / ED STEP'UP</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Axa Research Fund</b>

---

One of the outstanding challenges of probabilistic seismic hazard assessment is the inclusion of complex earthquake ruptures involving several neighboring faults in the hazard models while keeping alive the local geologic data in the hazard and risk calculation.

In this study, we implement two complementary modeling approaches to assess the rate and magnitude of earthquakes that can be expected in the North Anatolian fault system, the first step for assessing the seismic risk affecting the city of Istanbul, Turkey.

In the first approach, earthquake rates are computed using the code SHERIFS (Seismic Hazard and Earthquake Rate In Fault Systems) which explores in a statistical manner an ensemble of rupture scenarios (user defined). The main assumption made in SHERIF is that the magnitude frequency distribution (MFD) should respect an imposed shape at the system level.

In the second approach, earthquake rates are computed with RSQSim, a boundary element earthquake simulator based on the rate and state friction equation. Despite of the important simplifications in the modeling of the physical processes, RSQSim is computationally heavy; consequently the epistemic uncertainties affecting the large number of input parameters cannot be easily explored.

Computed earthquake rates following the two approaches are then compared to the rates estimated on the basis of the local earthquake catalog and the available paleoseismological data. In order to match the data, SHERIFS must impose a shape of the MFD that deviates from a Gutenberg-Richter distribution. The synthetic earthquake catalog generated with RSQSim shows a similar MFD shape and maximum magnitude, which suggest that the MFD shape modelled in SHERIFS might have some physical grounds and the geometrical complexities of the western NAF system probably impede the occurrence of  $M > 7.7$ .

By joining the two approaches, hazard modelers can build on the strength of each methodology. The computationally efficient SHERIFS allows exploring the epistemic uncertainties and RSQSim shed some light on the physically acceptable hypotheses. Even if RSQSim is heavily criticized in the earthquake modeler community, the inclusion of physics-based simulators as a part of the hazard model building process has the potential to improve the hazard models quality and their physical representation of the natural phenomenon.

This study is a promising step in the direction of including more physics in the hazard assessment scheme while preserving the local geological data and its uncertainty.



➤ **Mardi 2 avril**

**17 h 00 Salle Les 3 Fontaines**

## **SESSION PARALLÈLE**

### **Évaluation du risque sismique**

**Président : Oona SCOTTI**  
Esperta-séniore  
Pôle Santé-Environnement

**Marguerite MATHEY** - Quantification du champ de déformation 3D des Alpes occidentales et régions périphériques par géodésie spatiale et sismologie - interprétations tectoniques et apports au calcul de l'aléa sismique.

**Flomin TCHAWÉ NZIAHA** - Impact de la variabilité spatiale des propriétés linéaires et non-linéaires du sol sur le mouvement sismique.

**Arnaud MONTABERT** - Characterizing past ground motions from an archaeoseismological approach.

**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 au calcul de l'aléa sismique**

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

Les Alpes occidentales sont caractérisées par une sismicité modérée mais persistante. Cette thèse présente un double objectif : préciser les moteurs de cette déformation de surface qui reste mal comprise, et apporter des données et outils pour mieux caractériser l'aléa sismique. Il s'agit pour cela d'étudier les interactions entre déformations horizontale et verticale, et entre déformations de surface et sismicité, grâce à trois méthodes géophysiques complémentaires.

Le premier volet a consisté à dériver un champ de déformation géodésique haute résolution à partir des vitesses obtenues par GPS permanent et GPS de campagne depuis 1996. Les données de GPS (*Global Positioning System*) analysées confirment que le signal majeur de déformation actuelle est une surrection atteignant 2 mm/an dans la haute chaîne. La déformation horizontale quant à elle se caractérise par une extension Est-Ouest au centre de la chaîne, et par de la compression aux abords. Les taux de déformation géodésique obtenus à la fin de la première phase de la thèse vont être comparés en amplitude et en orientation aux taux de déformation sismique estimés dans le second volet de la thèse.

Dans ce deuxième volet, déjà commencé, les tenseurs de déformation sismique seront calculés à partir de plusieurs milliers de mécanismes au foyer inédits qui ont été déterminés à partir des événements enregistrés localement depuis 1989. Cette comparaison entre les déformations observées par les catalogues de sismicité et les mesures géodésiques vise à explorer les liens entre déformation horizontale et sismicité. Cette comparaison doit permettre de définir s'il existe un défaut de budget de déformation dans le catalogue de sismicité et corollairement (caractère asismique de la déformation).

Le troisième volet de la thèse se concentre sur l'emprise spatiale des déformations horizontale et verticale grâce à l'imagerie radar satellitaire. L'étude de la corrélation spatiale des déformations horizontale et verticale devra permettre de différencier les différents processus géologiques, tectoniques ou non, pouvant être à l'origine des déformations à l'échelle de l'arc alpin occidental. Ce volet a été démarré récemment ; nous n'avons pas encore obtenu de résultats.

**Sujet de la thèse :**

**Simulations numériques de la propagation des ondes sismiques en milieux hétérogènes ;  
Impact de la variabilité spatiale des propriétés du sol sur le mouvement sismique  
en surface**

<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</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 / ED-SIE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

When an earthquake occurs, seismic waves emanated from the earthquake's source propagate through the Earth's structure before reaching the surface. The characteristics of the propagation are controlled by the geometrical and mechanical properties of the underlying Earth's subsurface. In the final part of their trajectory, the seismic waves may be trapped by the superficial geological layers, which present a loose nature and high impedance contrast with the surround rocky materials. The result of such waves trapping is usually expressed by an increase in the amplification and duration of the Earthquake ground motion recorded at the surface, as it is generally the case of within sedimentary basins. Such local modification of earthquake ground motion is usually referred to as "site effects" in seismological literature. Buildings and installations based in such areas are more exposed to severe damage in case an earthquake occurs 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 seismic risks.

With the increase in computational power over the last decade, numerical simulations of seismic wave propagation have become a fast and efficient tool for site effect assessment and for understanding the physics of the wave propagation in such sites. Modeling seismic wave propagation requires a detailed spatial description of the Earth's subsurface structure and mechanical properties. Up to date, most numerical simulations of seismic wave propagation use subsurface models of mechanical properties assuming that the Earth's properties are smoothly varying in space within each layer. In reality, the Earth's properties vary both vertically and laterally, but the difficulty of seismic imaging methods to map small-scale variations makes it difficult to have deterministic models with both vertically and laterally varying mechanical properties. For this reason, statistical methods characterized by spatial autocorrelation functions are used for describing the lateral and vertical variations of the Earth's mechanical properties.

In this thesis, particular attention is paid to the Von Karman autocorrelation function, which is considered to efficiently model soil heterogeneities in seismology. Using a detailed 2-dimensional velocity model of the Nice (France) sedimentary basin, we analyze the effect of varying the properties of soil heterogeneities on surface ground motion. We show that increasing the scale length of soil heterogeneities leads to an average decrease of ground motion amplification at high frequency inside the basin.

**Sujet de la thèse :****Characterizing past ground motions from an archaeoseismological approach**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Arnaud MONTABERT</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SCAN / BERSSIN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Maria LANCIERI, Julien CLEMENT</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Hélène LYON-CAEN - Laboratoire de Géologie École Normale Supérieure</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Sorbonne / STEP'UP</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Allocation Spécifique ENS</b>

---

Information on the effect of past earthquakes is often delivered by historical writings. They give a qualitative description of damages induced by earthquakes and interpretation of the texts is a source of uncertainty. Such an information is however crucial in seismic hazard assessment and efforts must be done to get more accurate information about past ground motions. The scope of my thesis is to characterize past seismic motion from observed damages on historical buildings. An innovative methodology is proposed. It draws upon archaeology, history, civil engineering and seismology to go back to a quantitative description of damages. The proposed strategy is articulated in three main steps: to cross-check the historical information and archaeological analysis; to collect data to design a mechanical model of the church; to model its dynamic behavior to characterize the ground motions that provoked the documented damages.

My work is focused on the case study of the medieval church of the "Pieve di Sant'Agata" located in Central Italy in the northwest part of the Mugello basin. It is worth to underline that the Mugello basin is a unique test-case because it is located in high seismicity area, the faults structures are well known, the whole area is well instrumented, the properties of the basin have been deeply investigated, and the historical seismicity starting from the XVI century is well known. Indeed, thanks to the historical records we know that the church has been stroked by several earthquakes.

In my talk I will present how cross-checking the information issued by historical documents and the archeological campaign, it has been possible date back the evolution of church's geometry and the different stages of restoration. Moreover, the correlation between the restorations and earthquake occurrence in the area allows to discriminate the earthquakes that induced severe damages (1542, 1597, 1616), to those that let the building undamaged.

The ongoing work is the design of a mechanical model of the church. I thus participated to a photogrammetry and 3D scan survey, aimed to draw the geometry of the church. Further surveys are planned namely: ambient vibration record along the church walls and geophysical measurements of the ground. These measures will be exploited to retrieve the fundamental frequencies of the structure, its modal shapes, and mechanical parameters. In perspective, when the mechanical model will be achieved, it will be used to perform structural dynamic analysis aimed to quantify the building response to the seismic shaking. The seismic input is given by seismic ground motions recorded in Mugello area, and along the Italian Apennines.

➤ **Mardi 2 avril**

**17 h 00 Salle Camargue**

## **SESSION PARALLÈLE**

### **Comportement du corium en situation d'accident grave**

**Président : Jean-Michel BONNET**

Adjoint au directeur

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Shambhavi NANDAN** - Modelling the evolution of corium, in the vessel lower head, in case of a hypothetical severe accident.

**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 :

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

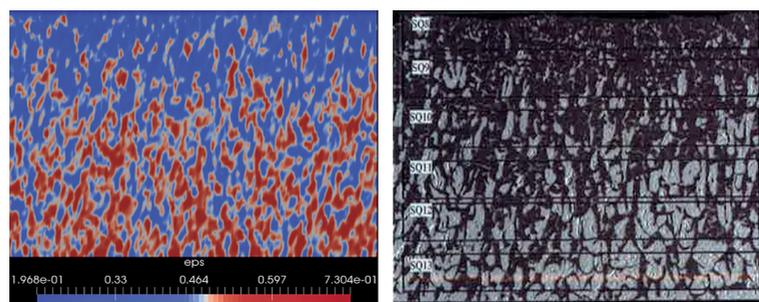
Doctorant :	Shambhavi NANDAN
Date du début de la thèse :	04 / 01 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Tuteur de thèse :	Florian FICHOT
Directeur de thèse :	Hervé COMBEAU – Mines de Nancy
Co-directeur de thèse :	Lounès TADRIST - IUSTI
École doctorale :	AMU / ED Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nano-électronique
Financement de thèse :	IRSN / IVMR

In case of the In-Vessel Retention (IVR) strategy, it is expected that the corium pool will be surrounded by an oxide crust, which will be in contact with molten steel from top of the pool as well as from sides of the vessel. It has been observed in CORDEB experiments (funded by IRSN, CEA and EDF), that this crust becomes permeable, which has an impact on the thickness of molten steel layer, lying on top of it. With respect to the IVR strategy, a thin molten steel layer on top of the crust may lead to an excessive heat flux to the Reactor Pressure Vessel (RPV), resulting in a possible rupture or melt-through. Such phenomenon is commonly known as focusing effect. The present work deals with the study of dissolution of such crust in order to estimate the time for molten steel to flow through the crust. From a thermochemical point of view, corium is a mixture of  $UO_2$ ,  $ZrO_2$  and Zr. The chemical interaction between these species and Fe plays an important role in the stability (or not) of the crust. It is a quaternary interaction among U, Zr, Fe and O atoms. However, a thermochemical study done in the first year of this thesis, shows that the quaternary system of U, Zr, Fe and O atoms, can be reduced to a pseudo-binary in each phase: (U, Zr) + O in the oxide phase and (U, Zr) + Fe in the metal phase. Consequently, the complex quaternary dissolution in the present work has been treated in a simplified way as the dissolution of a binary two phase porous region by molten steel (Fe). An up-scaled model has been derived by volume averaging transport equations — Mass, Momentum and Species transport — over a Representative Elementary Volume (REV). The final system of Partial Differential Equations (PDEs) has been closed by deriving some empirical relations for the effective diffusivity in the phases and for the mass transfer coefficient between the phases. The model has been solved numerically over a 2D domain to study the progress of dissolution in the two-phase region. The numerical results are compared with CORDEB experiment results. This, diffusion-dissolution study indicates that the effective diffusivity of species through the crust must be high, in order to reproduce the experimental observations (Fig. 1). Currently, the work related to solving volume averaged Navier-Stokes equation, in order to take care of convection, is going on, with a high fidelity, in house CFD solver called CALIF3S. Filtration of molten steel, through the liquid channels developed in the crust, is expected to be the result of convection calculations.

Fig. 1

Left: Numerical results obtained from mathematical model for dissolution in crust.

Right: CORDEB experiment result showing liquid channels in black and solid grains in grey.



## Sujet de la thèse :

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

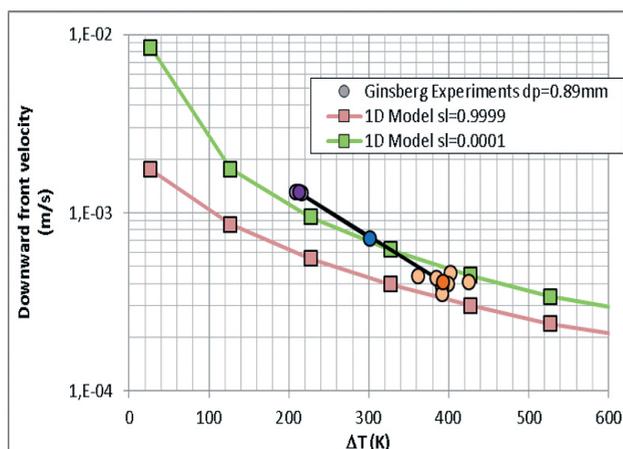
Doctorant :	Alejandro VILLARREAL LARRAURI
Date du début de la thèse :	23 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Tuteur de thèse :	Renaud MEIGNEN
Directeur de thèse :	Michel GRADEK – LMTA Université de Lorraine
École doctorale :	Université de Lorraine / ED Energie, Mécanique, Matériaux
Financement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

In case of a hypothetical severe accident with partial or extensive meltdown, the superheated magma made of molten steel and fuel called corium ( $T > 2500\text{K}$ ) may threaten the integrity of either the reactor pressure vessel (in-vessel) or the reactor containment building (ex-vessel), if long-term coolability is not assured. Depending on the scenario, corium can form a layer of millimeter particles with an intrinsic morphology (debris bed). If the heat generated in debris bed is higher than a certain limit, bed may re-melt and hinder/delay the stabilization of accidental progression. The objective of the thesis is to improve the comprehension and the modeling of the corium cooling phenomenology. In other words, the objective is to characterize the corium cooling capabilities in two expected configurations: debris bed, and a compact fractured crust.

The work has been done using a CFD code (MC3D) and by developing an analytical model. Previous experimental studies suggest that the debris bed quenching is a two-stage process. First, water penetrates the bed in form of water channels (water fingering), leaving a section unquenched. After reaching the lowest part, water will accumulate and flow towards the top. However, the precise characterization of the water fingering process is not entirely clear. CFD calculations indicate that water fingering is di-phasic. The analytical model provides explanations for this flow configuration, given the debris bed characteristics. A direct comparison with experimental results show that the main trends of the phenomena are captured within the applicability limits of the model in its preliminary 1D formulation (see figure). Further refinement and extension of the model into 2D is currently underway.

In the context of a collaboration with Argonne National Laboratory (ANL, USA) and EDF, the CCI-9 integral experiment (with concrete ablation and residual power) has taken place with a prototypical corium, specially designed to analyze the water ingress phenomenology (WI). Preliminary studies are ongoing to study the applicability of such model in the case of a compact fractured porous media with low permeabilities to simulate the water ingress

phenomenology. The results of the model and simulations in the case of a compact crust configuration are to be compared with the SSWICS tests (ANL, dedicated to WI analysis with fixed composition corium, no concrete ablation, and no residual power).



Downward front penetration velocity  
1D Model results (evaluated between two limits of  $sl$ ) for a debris bed made of particles with  $d_p=0.89\text{mm}$  vs. Ginsberg experimental results at different temperatures.



➤ **Mardi 2 avril**  
**20 h 45 Salle Les 3 Fontaines**

Après deux premières éditions en 2015 et 2017, l'IRSN organise à nouveau son concours « **3 minutes pour une thèse** ». Inspiré du concours international « **Ma thèse en 180 secondes** »\* destiné au public profane, il est ici adapté à l'assistance des Journées des thèses, une cible plus scientifique.

Il s'agit pour les doctorants de présenter leur sujet de recherche en trois minutes, en français et en termes simples, de la façon la plus claire, concise et convaincante possible. Ils ne peuvent s'appuyer que sur une seule diapositive, l'un des objectifs étant pour eux de développer leurs compétences en communication et, pour le public, de se concentrer sur leur prestation.

Un défi de taille et qui permet, avec légèreté, de sortir des sentiers battus en terme de présentation scientifique.

Le concours se déroulera après le dîner et sera animé par **Céline Dinocourt** et **Jean-Michel Bonnet**.

**Les participants seront :**

**Oumar Telly BAH** - Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée.

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

**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*.

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

**Gwenaël HOARAU** - Étude du comportement d'un moniteur de mesure de la contamination atmosphérique dans des conditions de chantier de démantèlement.

**Thomas JAILIN** - Étude expérimentale et modélisation du comportement d'un tube de gainage lors d'un accident de réactivité en phase post-crise ébullition.

**Amel KORT** - Développement d'un dispositif métrologique multi-capteurs pour la mesure du dépôt d'aérosols dans un local lors d'un incendie.

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

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

**Samuel PEILLON** - Influence des effets électrostatiques liés à la radioactivité sur les forces d'adhésion et sur la mise en suspension de particules.

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

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

\* Le concours **Ma thèse en 180 secondes**, lui-même inspiré du **Three minute thesis (3MT)** conçu en 2008 par l'Université du Queensland (Australie), est un concept repris au Québec en 2012 par L'association des savoirs francophones (Afcas), qui a souhaité l'étendre à l'ensemble des pays francophones. En France, le concours est organisé par des regroupements d'universités volontaires avec l'appui du CNRS et de la Conférence des présidents d'université (CPU).

➤ Mercredi 3 avril

08 h 30 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Modélisation des milieux argileux et cimentaires**

**Président : Georges NAHAS**

Professeur associé ENS Paris-Saclay

Pôle Sureté Nucléaire

**Rafael CHAVES DEPTULSKI** - Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle des pores dans des milieux déformables à l'aide de méthodes particulières (SPH).

**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 les déformations.

**Joffrey LHONNEUR** - Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons : expérimentations et simulations numériques.

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

**Sujet de la thèse :****Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle de 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 SMAER
<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 *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. Les résultats précédents sont capables de bien représenter l'écoulement diphasique, cependant les zones d'endommagement de la matrice élastique ne sont toujours pas bien localisées, ce qui ne nous permet pas de prédire une possible fracturation.

Afin d'optimiser la représentation de ce comportement d'endommagement, des simulations dynamiques d'efforts mécaniques dans une barre endommageable visent à discuter les avantages et inconvénients de l'utilisation d'une méthode numérique non-local (SPH) par rapport aux méthodes locales. Les résultats préliminaires démontrent la non-dépendance à la densité du maillage dans notre méthode pour la zone de localisation de l'endommagement et pour le comportement post-pic de la courbe contrainte-déformation. On a pu identifier également une possible relation entre un paramètre numérique et une propriété caractéristique du matériau. Cette étude permettra, en plus, l'application de différentes lois d'endommagement pour l'application aux argilites.

**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 les déformations**

<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>PSE-ENV / SEDRE / 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>École doctorale :</b>	<b>UPMC / ED Physique et Chimie des Matériaux</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>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.

L'IRSN questionne la durabilité des éléments bas-pH, puisque des études 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 et des conséquences de la carbonatation sur des matériaux bas-pH. Nous avons recours à de la carbonation accélérée et naturelle ( $P_{CO_2} = 3\%$  et  $0.04\%$ ) réalisée en enceintes de carbonatation à  $25^\circ\text{C}$  et  $55\%$  d'humidité relative.

L'approche adoptée est multi-échelles et mutli-matériaux. Nos matériaux modèles se présentent d'une part, sous forme de poudres d'(alumino)silicate de calcium hydraté (C(-A)-S-H) à différentes teneurs en calcium et en aluminium. Ces matériaux associent, une complexité chimique graduelle de par leurs teneurs croissantes en calcium et en aluminium et le couplage de la chimie des silicates et des aluminates. D'autre part, nous avons développé une méthodologie permettant la fabrication de matériaux bas-pH modèles (sous forme de pâtes), de microstructures variées et de complexité minéralogique croissante et contrôlée.

Les résultats obtenus montrent pour les C-(A)-S-H (poudres et pâtes modèles),

(1) l'obtention des mêmes produits de carbonation : du gel de silice avec une probable incorporation d'aluminium et/ou de calcium et de la vatérite en polymorphe principal de carbonate de calcium.

(2) La vitesse de carbonation semble être contrôlée par la teneur en calcium et en aluminium. Des environnements aluminium pentaédriques et octaédriques présents au sein des feuilletts et en surface des C A S H, détectés en résonance magnétique du noyau  $^{27}\text{Al}$ , corrélient avec une vitesse de carbonatation réduite.

Enfin, (3) les pâtes montrent une fissuration importante liée à la dégradation des C-S-H, cette dernière est d'autant plus importante en absence de la portlandite et de son effet tampon amenant à une réduction des propriétés diffusives au sein du matériau.

Les travaux à venir porteront sur la carbonation de pâtes industrielles afin de permettre une comparaison avec le comportement des pâtes modèles et la modélisation des données expérimentales afin d'extraire les cinétiques de carbonation.

**Sujet de la thèse :****Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons :  
expérimentations et simulations numériques**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Joffrey LHONNEUR</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>21 / 11 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA / LPTM</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline PÉLISSOU</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Moulay-Saïd EL YOUSOUFI - LMGC</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Montpellier / I2S</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

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 sur les caractéristiques des enceintes de confinement en béton.

Cette thèse vise à améliorer la compréhension et la simulation des phénomènes de vieillissement des bétons atteints de Réactions de Gonflement Interne (RGI) 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). Elle est réalisée dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN/CNRS/Université de Montpellier) qui développe des méthodologies couplant études expérimentales, modélisations multi-échelles du comportement du béton et simulations numériques.

À l'échelle locale, des essais de traction et de cisaillement ont permis d'alimenter une base de données expérimentale. Cette base devait permettre d'identifier le comportement mécanique à la rupture d'une pâte de ciment et de l'interface pâte de ciment / granulat, pour un état sain. Une étude numérique réalisée durant la première année de thèse a montré que cette base de données est insuffisante pour identifier correctement les paramètres élastiques et cohésifs à l'échelle locale. Deux facteurs sont majoritairement responsables de cette conclusion :

- la proximité immédiate des lieux d'application des conditions aux limites aux zones de fissuration implique de modéliser les conditions aux limites avec un niveau de détail élevé.
- le caractère hyperstatique de l'essai induit une sensibilité importante des champs mécaniques à la position des conditions aux limites rendant les essais non reproductibles.

Un nouvel essai mécanique est actuellement en cours de réalisation : il s'agit d'un essai de flexion trois points sur des éprouvettes composites (pâte de ciment pure et pâte de ciment / granulat) saines puis atteintes de RGI. Ces essais isostatiques permettront de mesurer les paramètres mécaniques élastiques et cohésifs de chaque type d'échantillon testé. Une modélisation simplifiée des conditions aux limites peut dans ce cas être utilisée pour calculer les champs mécaniques dans les éprouvettes.

Les paramètres mécaniques mesurés durant l'essai de flexion serviront à prédire par simulation numérique le comportement à la rupture d'une éprouvette mésoscopique de béton saine puis atteinte de RGI. Une étude expérimentale à l'échelle mésoscopique sera également menée durant la deuxième année pour confronter in fine les prédictions numériques aux observations et ainsi tester la validité du processus de changement d'échelle.

**Sujet de la thèse :**

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

Doctorant :	Adrien SOCIÉ
Date du début de la thèse :	09 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES
Directeur de thèse :	Yann MONERIE - LMGC
École doctorale :	Université Montpellier / I2S
Financement de thèse :	IRSN

Dans le cadre de l'extension de la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires, différents travaux de recherche visent à évaluer le vieillissement de certains de leurs composants. 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 dans le matériau durci entraînant des gonflements locaux dans la pâte de ciment et une fissuration par déformations différenciées. Les fissures créées constituent alors le lieu privilégié d'une nouvelle précipitation d'ettringite.

Une modélisation chimio-mécanique a été proposée afin d'évaluer l'impact de la précipitation d'ettringite sur les propriétés matériau d'un béton. La résolution est basée sur un algorithme étagé :

- 1. Transport d'espèces chimiques :** le transport des espèces chimiques influant sur la RSI est modélisé par une loi de Fick prenant en compte l'impact résistif de la fissuration,
- 2. Réactions chimiques :** connaissant les espèces chimiques en solution (principalement des ions), une résolution chimique, prenant en compte les réactions de précipitations-dissolutions, de sorptions et de spéciations, est mise en œuvre pour estimer le volume d'ettringite,
- 3. Mécanique :** connaissant le volume d'ettringite, une pression locale est calculée par un modèle poro-mécanique afin de modéliser le gonflement du matériau cimentaire. L'ouverture, la propagation et la pressurisation des fissures sont alors résolues par un modèle de Zone Cohésive.

Les travaux des deux premières années ont mis en place le modèle et son implémentation dans le logiciel Xper. Des applications sur les conséquences d'attaques sulfatiques internes et externes ont mis en avant les effets matériaux dans la cinétique d'expansion et de détérioration du béton.



➤ Mercredi 3 avril

09 h 50 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Météologie et instrumentation**

**Président : Flavien LEMOINE**

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

**Amel KORT** - Développement d'un dispositif métrologique multi-capteurs pour la mesure du dépôt d'aérosols dans un local lors d'un incendie.

**Gwenaël HOARAU** - Étude du comportement d'un moniteur de mesure de la contamination atmosphérique dans des conditions de chantier de démantèlement.

**Jiaxin XU** - Développement d'outils d'aide à l'expertise en spectrométrie gamma.

**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 - EMSE
<b>École doctorale :</b>	Université de Lyon/ ED SIS
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / ORANO

La thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme commun avec Orano sur des feux de mélanges solvants/acide nitrique contaminés par du plutonium et dont l'objectif principal est d'estimer les conséquences d'un incendie sur le confinement des substances radioactives dans une installation nucléaire de base. 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'aérosols pouvant être transportées dans les réseaux de ventilation et participant au colmatage des filtres Très Haute Efficacité. 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'un local, compte tenu du manque de données expérimentales pour juger de la pertinence des modèles de dépôt existants.

La première partie a été consacrée à l'identification des zones et des mécanismes prépondérants de dépôts de suies, à l'aide de modèles de dépôt implémentés dans le code de calcul ANSYS® CFX (Gélain *et al.*, 2016). La deuxième partie est consacrée au développement de préleveurs séquentiels, permettant de déterminer a posteriori les ordres de grandeur des masses déposées, et du dispositif multi-capteurs temps-réel. Ce dispositif sera 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. A ce stade, les préleveurs séquentiels ont été mis en œuvre lors des essais incendie PRISME réalisés dans les locaux de DIVA à grande échelle. Les masses déposées ont été quantifiées en fonction des emplacements de prélèvement grâce à une analyse thermo-optique *Organic Carbon / Elemental Carbon* (OC/EC) (Karanasiou *et al.*, 2015). De plus, un banc de dépôt de suies générées par un brûleur a été mis en place en parallèle d'une analyse OC / EC, permettant d'établir une corrélation entre la conductance et la masse des suies déposées sur le capteur résistif (Grondin *et al.*, 2015). La réponse de ce capteur correspond à une mesure de conductance entre deux électrodes sur lesquelles des suies se déposent et établissent des ponts. Le signal délivré dépend donc directement de la conductivité des particules de suies qui constituent ces ponts. Des mesures de conductivité électrique ont donc été réalisées et exprimées en fonction des porosités de pastilles de suies. La dernière étape de la thèse consistera à valider ce dispositif multi-capteurs lors d'expérimentations analytiques et semi-analytiques.

**Références :**

- Gélain, 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.
- Grondin, D., Breuil, P., Viricelle, J. P., & Vernoux, P. (2015). Development of a particulate matter sensor for diesel engine. In *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.838>.
- Karanasiou, A., Minguillón, M. C., Viana, M., Alastuey, A., Putaud, J.-P., Maenhaut, W., Kuhlbusch, T. A. J. (2015). Thermal-optical analysis for the measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) in ambient air a literature review. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. <https://doi.org/10.5194/amtd-8-9649-2015>.

**Sujet de la thèse :****Étude du comportement d'un moniteur de mesure de la contamination atmosphérique dans des conditions de chantier de démantèlement**

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

Lors des opérations de démantèlement des installations nucléaires, il est important de surveiller la contamination atmosphérique afin d'assurer la radioprotection des travailleurs. Les moniteurs de mesure de la contamination atmosphérique ont pour fonction de mesurer en temps réel les activités volumiques  $\alpha$  et  $\beta$  et pour but d'émettre une alarme en cas de dépassement d'un seuil. La réponse des moniteurs est généralement évaluée dans des conditions fixées par des normes internationales. En dehors de ces conditions, le comportement des moniteurs n'est pas caractérisé. D'ailleurs, en chantier de démantèlement, les moniteurs émettent fréquemment des fausses alarmes  $\alpha$  artificiel alors qu'aucun radionucléide émetteur de rayonnement  $\alpha$  artificiel n'est présent. Pour étudier ce comportement inapproprié, une campagne de mesures a été réalisée par Dogniaux *et al.* (2015). Celle-ci a mis en lumière deux informations : la présence de grosses particules ( $> 10 \mu\text{m}$ ) et des vitesses importantes d'accumulation massique de particules sur le filtre de prélèvement au moment de certains déclenchements de fausses alarmes.

Sur la base de ces informations, nous avons conçu et validé un dispositif expérimental dans lequel il est possible de générer, de manière contrôlée, des aérosols. Ainsi, dans ce dispositif de laboratoire, nous sommes désormais en mesure de recréer un environnement représentatif d'un chantier de démantèlement. Cependant, avant d'exposer le moniteur à cet environnement, il est important de quantifier ce que le moniteur est réellement en mesure de collecter. En effet, l'hypothèse actuelle est que les déclenchements de fausses alarmes sont corrélés à une dégradation de la mesure nucléaire qui est elle-même liée à la présence de grosses particules sur le filtre de prélèvement. Par extrapolation, plus le moniteur est capable de prélever des grosses particules et plus la mesure sera dégradée, ce qui conduira *in fine* à un faux déclenchement. L'étude a finalement montré une efficacité d'échantillonnage du moniteur égale à 100 % pour des particules de diamètre aérodynamique ( $d_a$ ) allant de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Au-delà, l'efficacité d'échantillonnage chute brutalement pour atteindre 50 % pour un  $d_a$  égal à 25  $\mu\text{m}$ .

L'exposition du moniteur à un environnement représentatif d'un chantier de démantèlement permet d'ores et déjà d'observer des comportements inappropriés de celui-ci comme en chantier de démantèlement. La suite de l'étude consiste à quantifier l'évolution de l'activité  $\alpha$  artificiel mesurée par le moniteur en fonction des paramètres d'influence, à savoir la granulométrie des particules et la vitesse d'accumulation massique des particules sur le filtre de prélèvement. Cette quantification permettra *in fine* d'identifier les situations à risque d'émission de fausses alarmes.

## Sujet de la thèse :

## Développement d'outils d'aide à l'expertise en spectrométrie gamma

Docteurant :	Jiaxin XU
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSE-ENV / SAME / LMRE
Tuteur de thèse :	Anne de VISMES OTT
Directeur de thèse :	Jérôme BOBIN - CEA
École doctorale :	Université Paris-Saclay / STIC
Financement de thèse :	IRSN

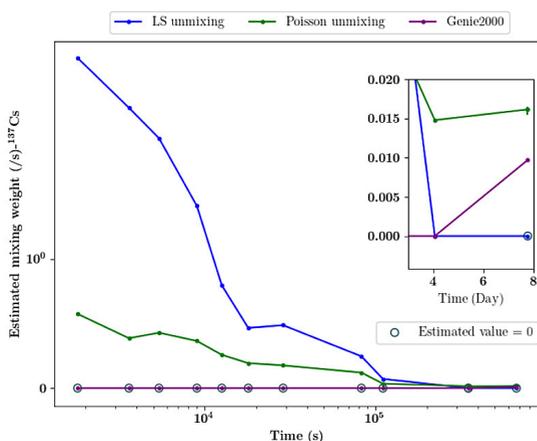
**Contexte** - Dans le cadre de la mission de l'IRSN de surveillance radiologique de l'environnement, le Laboratoire de Métrologie de la Radioactivité dans l'Environnement effectue depuis près de 60 ans des mesures d'échantillons prélevés dans l'environnement afin d'identifier et quantifier les radionucléides 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, et elle nécessite également beaucoup de temps et d'expertise.

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

**Étapes de travail** - En première année de thèse, nous avons travaillé sur l'estimation des activités en spectrométrie gamma basée sur le démelange spectral, c'est-à-dire la séparation en contributions spectrales élémentaires. Contrairement aux méthodes standard, le démelange spectral permet de traiter le spectre dans sa globalité (pic et fond continu) et prend en compte la statistique du processus de Poisson régissant la spectrométrie gamma.

Le démelange spectral est modélisé comme un problème inverse sous la contrainte de non-négativité. D'abord, les algorithmes sont implémentés et testés sur les données simulées par des codes de type Monte Carlo. Les résultats sur les spectres simulés démontrent que le démelange spectral améliore la précision de l'estimation avec les erreurs relatives et incertitudes plus faibles. Ensuite, ils sont testés sur les données réelles. La Fig.1 montre l'estimation de  $^{137}\text{Cs}$  avec les différentes approches : le  $^{137}\text{Cs}$  est identifié et quantifié avec l'estimateur de Poisson 4 jours avant la méthode habituelle.



Actuellement, nous étudions l'approche du démelange spectral pour l'utilisation de dictionnaires de signatures de grande taille, tout en limitant les effets de sur-ajustement par modélisation parcimonieuse.

La suite de travail consistera à : i) perfectionner la méthode démelange spectral (par ex. en utilisant des signatures temporelles des radionucléides, en prenant en compte les incertitudes sur le mouvement propre) ii) mettre en œuvre des techniques d'apprentissage afin d'améliorer l'approche du démelange spectral.

**➤ Mercredi 3 avril****SESSION POSTER à 10 h 50 Salle Mistral****SESSION PARALLÈLE à 13 h 50 Salle Les 3 Fontaines****Effets radio-induits et traitement****Président : Irène SOROKINE-DURM**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**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).

**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.

**Annaïg BERTHO** - Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique : modélisation préclinique 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 des cellules stromales mésenchymateuses.

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

---

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 radio-induits 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 radio-induits à l'ADN.

Un des objectifs de cette thèse est de faire le lien entre les dommages biologiques obtenus expérimentalement par les radiobiologistes du SERAMED/LRacc et ceux issus des simulations Monte Carlo. Pour cela, il est nécessaire de calculer les cassures double brins (CDB) à l'ADN dans des modèles géométriques réalistes de noyaux cellulaires comprenant les deux niveaux de compaction de la chromatine à savoir l'hétérochromatine (condensée) et l'euchromatine (décondensée). A l'aide de l'outil DnaFabric, j'ai développé un modèle géométrique d'euchromatine qui a été combiné à celui d'hétérochromatine développé dans une thèse précédente. Cela a permis de générer un modèle réaliste de noyau d'une cellule endothéliale comprenant une répartition de 52% d'euchromatine et 48% d'hétérochromatine. Cette géométrie est ensuite utilisée dans une simulation Monte Carlo Geant4-DNA qui permet le calcul des CDB en prenant en compte les dommages directs et indirects.

Une première étude sur le nombre de dommages à l'ADN par irradiation avec protons et alphas de différentes énergies, et en fonction du type de noyau cellulaire (différents volumes) ne comprenant que le modèle d'hétérochromatine, a montré que le nombre de dommages était influencé par le volume nucléaire et par la densité d'ADN à l'échelle microscopique (article publié).

L'introduction dans la modélisation du modèle d'euchromatine a ensuite permis d'obtenir des résultats montrant une augmentation du nombre de dommages lorsque les deux types de compaction de la chromatine sont considérés (article publié).

Des modèles paramétriques existants et permettant de calculer la réparation des CDB et la survie cellulaire ont également été étudiés et utilisés avec les données issues de mes simulations.

Enfin, des simulations reproduisant des expériences faites au LRacc avec différentes sources de photons (spectres des installations SARRP et Alphée de l'IRSN) ont été effectuées. Les premiers résultats montrent un bon accord entre simulations des CDB et données expérimentales des foyers radio-induits 30 minutes après irradiation.

**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**

<b>Doctorant :</b>	Manon JACQUEMIN
<b>Date du début de la thèse :</b>	03 / 10 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PSE-SANTE / SDOS / LEDI
<b>Tuteur de thèse :</b>	Aurélie DESBREE
<b>Directeur de thèse :</b>	Didier FRANCK - IRSN
<b>École doctorale :</b>	Université Paris-Saclay / PHENIICS
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

Les cellules marquées avec des émetteur  $\beta^+$  pour l'imagerie TEP sont exposées à des activités très élevées lors de leur incubation, ce qui peut entraîner une mortalité des cellules et donc une perte de la qualité de l'image. De plus, la réinjection au patient de cellules potentiellement altérées peut poser question. Dans la littérature, les résultats sont assez hétérogènes et les comparaisons délicates car l'aspect dosimétrique est peu traité.

Cette thèse vise à évaluer de manière précise les doses reçues aux cellules pendant le marquage et les corréliser aux effets observés. L'étude de la relation dose-effet permettra d'offrir une meilleure compréhension des mécanismes de la toxicité induite par les émetteurs  $\beta^+$  de déterminer les paramètres de marquage qui minimisent les effets aux cellules.

Un modèle dosimétrique a été développé pour le calcul de la dose absorbée moyenne à la cellule, applicable à tout type de distribution et radionucléide.

La méthode de calcul repose sur (i) le calcul avec MCNP6 de l'énergie déposée pour différentes distances cellule à cellule et (ii) l'implémentation d'un programme Python qui génère la distribution spatiale des cellules et somme les différentes contributions. A partir de ce modèle, une étude systématique de l'effet de deux paramètres de marquage, *i.e.*, la densité cellulaire et l'efficacité de marquage, sur la dose absorbée à la cellule a été réalisée pour trois radiopharmaceutiques:  $^{18}\text{F}$ -FDG,  $^{64}\text{Cu}$ -PTSM et  $^{68}\text{Ga}$ -DOTA-peptide. Les résultats ont permis de mieux comprendre comment la dose cellulaire est influencée par ces paramètres et d'identifier les conditions où la dosimétrie cellulaire se révèle nécessaire par rapport à la dosimétrie conventionnelle. Dans le cas du marquage le plus courant au  $^{18}\text{F}$ -FDG, la dose conventionnelle peut sous-estimer jusqu'à 5 fois la dose à la cellule dans des conditions standards.

Nous avons également exploré une autre méthode de calcul de la dose à la cellule basée sur l'utilisation de fonctions de distribution radiale dérivées du logiciel de dynamique moléculaire LAMMPS. Ceci a montré que la dose absorbée à la cellule n'était pas influencée de manière significative par le type de distribution cellulaire considéré (réseau de cellules ou distribution aléatoire uniforme).

Des expériences de marquages de cellules mésenchymateuses et lymphoblastoïdes au  $^{18}\text{F}$ -FDG sont actuellement en cours. Celles-ci visent à étudier l'influence de la densité cellulaire, activité volumique et temps d'incubation sur l'efficacité de marquage.

En perspectives, des tests de fonctionnalité cellulaire après marquage au  $^{18}\text{F}$ -FDG pour l'étude des effets radioinduits *e.g.*, viabilité, clonogénicité, prolifération, seront réalisés et comparés aux résultats obtenus en irradiation externe.

**Sujet de la thèse :****Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique :  
modélisation préclinique et aspects radiopathologiques**

<b>Doctorant :</b>	Annaïg BERTHO
<b>Date du début de la thèse :</b>	2 / 11 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
<b>Tuteur de thèse :</b>	Agnès FRANÇOIS
<b>Directeur de thèse :</b>	Agnès FRANÇOIS - IRSN
<b>École doctorale :</b>	Sorbonne Université / ED Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutiques
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

La radiothérapie stéréotaxique est une technique permettant l'irradiation de très petits volumes avec une précision submillimétrique. La réduction du volume irradié permet l'utilisation de doses dites ablatives, allant de 6 à 20 Gy par fraction. La radiothérapie stéréotaxique est utilisée comme alternative à la chirurgie pour le traitement des tumeurs pulmonaires non à petites cellules. Aujourd'hui, le manque de données radiobiologiques aux fortes doses par fraction reste une problématique.

Le SARRP (*Small Animal Radiation Research Platform*) 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 1<sup>ères</sup> irradiations ont permis d'observer l'effet du volume irradié grâce à l'utilisation de 4 collimateurs différents : 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'irradiation génère une pneumopathie radique aiguë suivie d'une fibrose. Globalement, seul le collimateur 3x3mm<sup>2</sup> permet d'étudier les réponses aiguës et tardives du tissu pulmonaire.

L'étude de l'effet de la dose d'irradiation a été réalisée grâce à une gamme de 6 doses uniques (entre 20 et 120 Gy), avec le collimateur 3x3mm<sup>2</sup>. L'étude montre d'une part que le volume pulmonaire irradié tolère de très fortes doses et d'autre part que la dose minimale pour générer de la fibrose pulmonaire dans cette configuration est supérieure à 40 Gy.

L'étude de l'effet du fractionnement de la dose est en cours. Les protocoles sont délivrés en 3 fractions, de 20, 28, 40 ou 50 Gy.

Pour tous ces protocoles, l'expression d'une dizaine de gènes au sein du volume cible, en zone pleurale et dans le poumon controlatéral a été mesurée. Les analyses sont en cours.

*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. Les analyses sont en cours.

Cette modélisation permet d'acquérir des données radiobiologiques *in vivo*, qui associées aux données radiobiologiques *in vitro* permettront 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 des cellules stromales mésenchymateuses**

**Docteurant :** Alexia LAPIÈRE  
**Date du début de la thèse :** 02 / 11 / 2016  
**Laboratoire :** PSE-SANTE / SERAMED / LRMed  
**Tuteur de thèse :** Alexandra SEMONT  
**Directeur de thèse :** Marc BENDERITTER – IRSN  
**Co-directeur :** Jean-Marc CHATEL - INRA  
**École doctorale :** Sorbonne Université / ED Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique  
**Financement de thèse :** IRSN

---

La radiothérapie est l'un des traitements les plus utilisés pour soigner les cancers de la zone abdomino-pelvienne. L'irradiation des tissus environnant la tumeur entraîne des effets secondaires. L'apparition tardive de complications a donné lieu en 2010 à la définition d'une nouvelle pathologie, la « *Pelvic Radiation Disease* » ou PRD. Les dysfonctionnements du tractus digestif altèrent considérablement la qualité de vie des patients et les traitements restent symptomatiques. La physiopathologie de la PRD a 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 fécal après radiothérapie. Les populations *Faecalibacterium prausnitzii* (*Fp*) qui, en condition physiologique, jouent un rôle important dans l'intégrité de la barrière intestinale sont plus particulièrement diminuées.

Les résultats obtenus au LRMed sur des modèles animaux d'altérations intestinales radio-induites montrent que l'efficacité thérapeutique des CSM sur l'épithélium n'est totale que lorsque l'inflammation et les dommages sont modérés (présence de cellules souches fonctionnelles dans la crypte). Dans un modèle d'ulcération sévère radio-induite du côlon, l'efficacité des CSM sur la réparation épithéliale reste transitoire et partielle. Cette étude s'inscrit dans la potentialisation de cette thérapie cellulaire, en associant aux CSM une administration 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 ou 7 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, de l'état de renouvellement de l'épithélium colique, des paramètres inflammatoires et de la perméabilité du tissu colique. Une étude à plus long terme a été réalisée pour analyser l'efficacité de l'association de *Fp* et des CSM pour diminuer de façon préventive ou curative l'ulcération colique radio-induite.

Nos résultats montrent que l'administration journalière de *Fp* réduit les zones de cryptes atypiques, augmente la capacité proliférative des cellules épithéliales, le nombre de cellules progénitrices /souches marquées SOX9 et le nombre de *tuft cells*, et diminue les paramètres inflammatoires ainsi que la perméabilité colique para-cellulaire. L'analyse des résultats à long terme de l'association de *Fp* et des CSM est en cours.

Nous avons démontré que *Fp*, en préservant l'intégrité de la barrière épithéliale du côlon exerce une action radio-protectrice. Ces résultats semblent prometteurs quant à l'efficacité thérapeutique d'un co-traitement par *Fp* et CSM.



➤ Mercredi 3 avril

13h50 Salle Camargue

## SESSION PARALLÈLE

### **Endommagement des matériaux**

**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.

**Kathleen PELÉ** - Analyse géostatistique de microstructures mécaniques et applications aux études de vieillissement des matériaux hétérogènes.

**Sujet de la thèse :****Modélisation micromécanique de l'endommagement ductile par une approche cohésive-volumique : application à l' $UO_2$  irradié**

---

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

---

Le dioxyde d'uranium  $UO_2$ , 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 1 200 °C. En situation accidentelle postulée de type accident d'insertion de réactivité (*Reactivity Initiated Accident* [RIA]), des températures élevées (qui peuvent être 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 porte sur la modélisation et la simulation numérique de l'endommagement et de la fissuration du combustible  $UO_2$  irradié. L'objectif appliqué est d'investiguer finement les mécanismes de fissuration du combustible lors d'un transitoire de type RIA.

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 modèle de zone cohésive développé sur des bases micromécaniques est proposé, notamment par une synthèse du modèle d'endommagement ductile volumique de Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) sous une formulation cohésive. Ce modèle de zone cohésive permet d'une part de retrouver avec un bon accord la réponse d'une cellule unitaire avec un comportement de type GTN et d'autre part de prendre en compte l'influence de la direction du chargement au voisinage de la fissure (triaxialité des taux de déformation).

Le traitement numérique du modèle se fait dans le cadre d'une méthode de dynamique non régulière des contacts (NSCD), dans laquelle les modèles de zones cohésives sont introduits comme une condition mixte entre éléments finis volumiques. L'implémentation numérique a été réalisée sur le logiciel Xper (code de calcul dédié à la simulation de la fragmentation dynamique des milieux hétérogènes). La démarche a été appliquée à la simulation d'un essai standard de propagation de fissure dans un acier ferritique et validée par comparaison à des données expérimentales disponibles (essais de traction sur éprouvettes entaillées). En perspective, il est envisagé d'identifier les paramètres du modèle pour l' $UO_2$  en utilisant des résultats expérimentaux disponibles et d'appliquer cette approche pour simuler la fragmentation d'une tranche de combustible soumise à des conditions de type RIA.

## Sujet de la thèse :

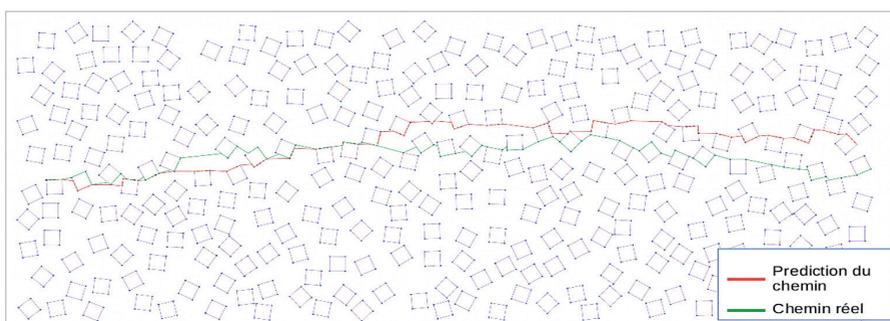
**Analyse géostatistique de microstructures mécaniques et applications  
aux études de vieillissement des matériaux hétérogènes**

Doctorant :	Kathleen PELÉ
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LIMAR
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES, Jean BACCOU, Thibaut LE GOUIC, Yann MONERIE
Directeur de thèse :	Jacques LIANDRAT - École Centrale Marseille
Co-directeur de thèse :	Loïc DARIDON - LMGC Montpellier
École doctorale :	École de Mathématique et d'Informatique de Marseille
Financement de thèse :	IRSN / Centrale Marseille

Ce travail s'inscrit dans le cadre des études du vieillissement du béton des enceintes de confinement des centrales nucléaires. Il est important d'analyser les conséquences des modifications dues à des pathologies du béton (Réaction de gonflement), notamment en termes de fissuration qui peuvent dégrader le confinement de l'enceinte. Le béton est un matériau très hétérogène (granulats de tailles et d'orientations diverses, mortier poreux) ce qui rend son étude complexe. Afin de s'affranchir de la variabilité des composants du béton, on essaie de construire une représentation numérique. Dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN-CNRS-UM), l'IRSN réalise des études à l'aide du code de calcul XPER [1] permettant d'analyser les mécanismes de propagation de fissures au sein de matériaux hétérogènes. Cette microstructure de béton numérique est qualifiée d'équivalente par rapport à la réalité et sa construction s'appuie sur l'utilisation de descripteurs morphologiques [2,3]. Mais les descripteurs issus de la littérature ne sont pas suffisants pour distinguer des microstructures avec des comportements différents en termes de fissuration. Il est donc important de développer un « estimateur » du trajet de fissuration rapide et efficace permettant d'appréhender l'influence de la variabilité sur les trajets de fissuration.

Les travaux de thèse portent sur la construction d'un outil adapté à la caractérisation de la fissuration. Cette construction s'appuie sur la mise en place de deux nouveaux descripteurs morphologiques intégrant des informations locales sur la répartition des granulats au sein d'une microstructure (distance, angle). Ces nouveaux descripteurs sont exploités à travers un modèle statistique de type chaîne de Markov dont les paramètres sont déterminés par une méthode de machine learning [3].

*Fig.1: Résultat d'une prédiction donnée par le modèle.*



Ce modèle réalise des prédictions des trajets de fissure. Les différentes prédictions réalisées ont donné de bons résultats sur le faciès de rupture et la tortuosité, proche des expériences numériques (voir Fig.1). Les descripteurs caractérisent donc bien le comportement de la fissuration. Il s'agira de tester la robustesse du modèle de prédiction sur des microstructures plus complexes avec des granulats de tailles et de formes différentes.

- [1] Y. Monerie B. Piar L. Stainier F. Perales, F. Dubois. A nonsmooth contact dynamics-based multi- domain solver. Code coupling (xper) and application to fracture. Eur.J. Comp. Mech, 2010.  
 [2] Dominique Jeulin Caractérisation morphologique et modèles de structures aléatoire Hermes Science, 2015.  
 [3] J. Friedman T. Hasti, R. Tibshirani. The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction Springer Series in Statistics, 2013.



➤ Mercredi 3 avril

15 h 00 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PARALLÈLE

**Exposition à faible dose des rayonnements ionisants :  
des modifications moléculaires aux troubles comportementaux**

**Président : François BRÉCHIGNAC**  
Directeur délégué à l'évaluation scientifique  
Direction générale

**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 micro-environnement hippocampique.

**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.

**Rémi GUÉDON** - Effets transgénérationnels d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants : de l'épigénome au phénotype.

**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 neurogénèse et du micro-environnement hippocampique**

**Doctorant :** Céline SERRANO  
**Date du début de la thèse :** 09 / 10 / 2017  
**Laboratoire :** PSE-SANTE / SESANE / LRTOX  
**Tuteur de thèse :** Christelle DURAND – IRSN, Roseline POIRIER - Université Paris-Saclay  
**Directeur de thèse :** Philippe LESTAEVEL - IRSN  
**École doctorale :** Université Paris-Saclay / ED Innovation thérapeutique du fondamental à l'appliqué  
**Financement de thèse :** IRSN

Le scanner est l'une des procédures de diagnostic médical la plus couramment utilisée pour l'exploration de la tête chez l'enfant. Cependant, les conséquences, à long terme, d'une exposition cérébrale précoce, à des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants, sur l'apprentissage et la mémoire ne sont pas clairement établies chez l'homme. L'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques dans ce domaine représente un enjeu sociétal majeur qui s'inscrit directement dans les missions de l'institut.

L'hippocampe est l'une des structures cérébrales impliquées dans les processus mnésiques. Son altération, suite à des irradiations, pourrait être à l'origine de troubles cognitifs. Au cours de la vie postnatale et adulte, la neurogenèse se poursuit au sein du gyrus denté de l'hippocampe. L'intégration des nouveaux neurones formés postnatalement au sein des réseaux préexistants joue un rôle dans plusieurs formes de mémoire «dépendantes de l'hippocampe».

L'objectif de notre projet est d'étudier l'impact de l'irradiation postnatale (doses de 0.25, 0.5, 1 et 2Gy) sur l'apprentissage et la mémoire spatiale ainsi que sur les processus de neurogenèse hippocampique adulte. Deux types d'exposition ont été réalisés: une exposition du cerveau entier et une exposition ciblée du gyrus denté dorsal. Des souris C57BL / 6 âgées de dix jours ont été irradiées grâce à un système de micro-irradiation du petit animal guidé par l'image, le « *Small Animal Radiation Research Platform* (SARRP) ». L'apprentissage et la mémoire spatiale à long terme ont été évalués trois mois après l'exposition grâce au test du labyrinthe aquatique.

Les résultats suggèrent que l'apprentissage spatial n'est pas altéré par les irradiations aux doses testées pour les deux modèles d'exposition. Cependant, certains groupes (2Gy dans les deux modèles et 0.25Gy pour une exposition totale du cerveau) semblent apprendre plus rapidement que le groupe témoin. La mémoire spatiale à long terme est, quant à elle, affectée par une irradiation du gyrus denté dorsal à la dose de 1Gy. Nos résultats démontrent un effet dose-réponse non linéaire dans ce contexte d'exposition.

Actuellement, les processus de neurogenèse et de neuro-inflammation sont étudiés afin de comprendre les altérations cognitives observées après une irradiation ciblée à 1Gy.

Ces travaux apporteront des données supplémentaires pour le système de radioprotection de l'enfant.

**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**

<b>Docteurant :</b>	Sophia MURAT EL HOUDIGUI
<b>Date du début de la thèse :</b>	03 / 10 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PRP-ENV / SRTE / LECO
<b>Tuteur de thèse :</b>	Olivier ARMANT
<b>Directeur de thèse :</b>	Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN
<b>École doctorale :</b>	AMU / ED Sciences de l'Environnement
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

Suite aux accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima et de par l'utilisation croissante des radionucléides, la radioprotection de l'environnement constitue une source de préoccupation majeure. Des études démontrent une sensibilité aux rayonnements ionisants (RI) accrue lors du développement. Cependant, il existe peu de données sur les mécanismes (épi)génétiques conduisant à des effets sur l'embryogenèse. L'objectif du projet est de mieux comprendre les effets précoces d'une exposition chronique aux RI. Pour cela, les modes d'actions toxiques des RI au niveau (épi)génétique et leurs conséquences sur le développement et les fonctions du système nerveux central (SNC) sont étudiés chez le poisson zèbre.

Des œufs fécondés ont été exposés du stade 4 cellules au stade larvaire à des rayons gamma émis par une source de  $^{137}\text{Cs}$  (MICADO'LAB). Cinq débits de dose ont été choisis (de  $5\mu\text{Gy/h}$  à  $50\text{mGy/h}$ ). Le fond radioactif résiduel dans la zone d'exclusion de Tchernobyl varie de  $0,1\mu\text{Gy/h}$  à  $1\text{mGy/h}$ . L'effet des RI sur le développement embryonnaire a été évalué par une analyse morphologique, physiologique (battement cardiaque) et des tests comportementaux. Au niveau moléculaire, l'expression des gènes a été mesurée par mRNA-seq, RT-qPCR et hybridation d'ARN *in situ*. La méthylation de l'ADN a été étudiée de manière globale par séquençage du génome après traitement au bisulfite.

Les données montrent une augmentation des foyers  $\gamma\text{-H2AX}$  chez les embryons à  $50\text{mGy/h}$  à 24 et 48 heures post-fécondation (hpf). L'analyse préliminaire du transcriptome a été réalisée à 24, 48, 96hpf à 5 et  $50\text{mGy/h}$ . Parmi les 35 117 gènes du poisson zèbre, 782 sont dérégulés conjointement aux deux débits de dose à 24hpf. Parmi ces gènes, de nombreux sont impliqués dans le développement du SNC et en particulier dans la voie de l'acide rétinolique, une voie majeure du développement embryonnaire chez tous les vertébrés. Enfin l'activité embryonnaire à 24hpf a été mesurée comme un paramètre complémentaire et intégratif des effets mesurés à l'échelle moléculaire. Une augmentation de l'activité du réseau neuronal dans la moelle épinière a été mise en évidence à  $5\text{mGy/h}$ .

Le travail réalisé durant la thèse a permis de mettre en évidence des modifications d'expression des gènes intervenant au cours de l'embryogenèse. Ces modifications ont été mises en lien avec des effets macroscopiques. L'analyse transcriptomique est en cours à des débits de doses plus faibles. De plus, une analyse comparée des données de méthylation et de transcriptomique est en cours afin de faire un lien entre les mécanismes génétiques et épigénétiques.

### Sujet de la thèse :

#### Effets transgénérationnels d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants : de l'épigénome au phénotype

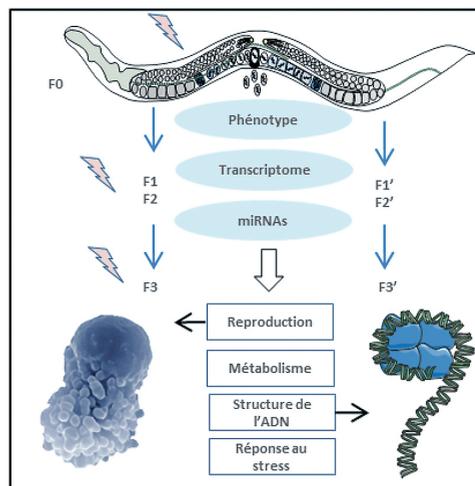
Doctorant :	Rémi GUÉDON
Date du début de la thèse :	13 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Catherine LECOMTE-PRADINES
Directeur de thèse :	Catherine LECOMTE-PRADINES - IRSN
Co-directeur de thèse :	Simon GALAS - CNRS
École doctorale :	AMU / ED Sciences de l'environnement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

L'exposition chronique aux rayonnements ionisants (RI) induit des réponses moléculaires pouvant conduire à des modifications de caractères observables (phénotypes). Des études montrent que certains phénotypes sont transmis d'une génération à l'autre et peuvent s'accompagner d'une aggravation des effets ou, inversement, d'une adaptation aux conditions environnementales.

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)généétiques dans la régulation et la transmission d'informations entre les générations.

L'exposition à une dose de 50 mGy/h sur 4 générations de *C. elegans* (nématode) entraîne une diminution de la reproduction de 37%. Cet effet persiste chez la progéniture non exposée (diminution de 25% de la reproduction sur trois générations). L'analyse du transcriptome (ARNm et miARNs) montre des profils d'expression différents entre les conditions, impliquant quatre grandes fonctions biologiques (gouvernées par les voies de régulation Daf-2/Daf-16, mTOR et p53) : le métabolisme, la réponse au stress, la structure de l'ADN et la reproduction (oogénèse et spermatogénèse). Nous avons notamment observé une modification de l'expression des gènes et de microRNAs impliqués dans la spermatogénèse et la mobilité des spermatozoïdes associée à une diminution du nombre de spermatozoïdes et de la qualité du sperme. L'atteinte des cellules germinales, garantes de la transmission d'information et de l'intégrité de la descendance, pourrait expliquer la transmission des effets observés lors d'une exposition chronique aux RI. Une analyse des modifications post-traductionnelles d'histones, marque épigénétique responsable de la transmission d'information *via* la structure de l'ADN est en cours afin de tester cette hypothèse.

En conclusion, ces résultats mettent en évidence que l'irradiation chronique altère les capacités de reproduction des organismes, notamment par l'atteinte des cellules germinales. La transmission de ces effets entre les générations suggère l'implication de régulations épigénétiques (miARNs, histones). L'analyse des résultats de transcriptomique, complétée par une analyse du taux de modification des histones, permettra d'identifier les voies de régulation déterminantes dans les changements phénotypiques observés. Le rôle de ces voies sera validé par des analyses fonctionnelles à l'aide d'organismes génétiquement modifiés.



➤ Mercredi 3 avril

15 h 00 Salle Camargue

**SESSION PARALLÈLE**

**Suivi du vieillissement des matériaux cimentaires**

**Président : Nary RANAIVOMANANA**

Maître de conférences

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions  
INSA-UPS, INSA-GÉNIE CIVIL

**Arthur PICHELIN** - Proposition d'un indicateur de durabilité pour la détection des réactions de gonflement interne du béton.

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

**Ismail ALJ** - Durabilité des capteurs à fibres optiques destinés à la mesure des déformations des ouvrages en béton.

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

<b>Doctorant :</b>	Arthur PICHELIN
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP / SES / LMAPS
<b>Tuteur de thèse :</b>	Georges NAHAS
<b>Directeur de thèse :</b>	Myriam CARCASSES - LMDC
<b>École doctorale :</b>	Université Paul Sabatier / MEGEP
<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 dégradation du béton et à la création de fissures dans les ouvrages atteints par ces pathologies.

Dans les ouvrages nucléaires et en particulier dans les pièces massives, l'éventualité de rencontrer ces réactions ne peut pas être écartée. Cependant pour évaluer avec précision le risque et évaluer les conséquences, il faudrait trouver un moyen de détecter leur présence dans l'ouvrage et leurs états d'évolution. D'autant que la prolongation de la durée de l'exploitation des réacteurs est envisagée.

Depuis plusieurs années, l'approche performantielle de la durabilité des bétons se développe et 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.

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

- 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 ont été 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 sont étudiées sur des éprouvettes de [suivant les normes d'essais].

Les premiers résultats obtenus sur des éprouvettes développant la RSI sont prometteurs. En effet, certains de ces essais comme la résistivité électrique, très facile à mesurer montrent une sensibilité importante vis-à-vis de la propagation de la microfissuration, générée par le développement de la pathologie. La transposition de ces essais sur les blocs de béton du projet ODOBA à l'échelle de la structure permettra de confirmer la tendance des résultats obtenus en laboratoire. Par la suite l'étude de la RAG et du couplage des pathologies est envisagée. L'objectif final est maintenu comme défi scientifique de cette thèse pour permettre la proposition d'un indicateur de durabilité pour la détection des réactions de gonflement interne dans le béton, un enjeu économique et sociétal important, et en particulier dans le cadre de la prolongation de durée d'exploitation des réacteurs nucléaires.

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

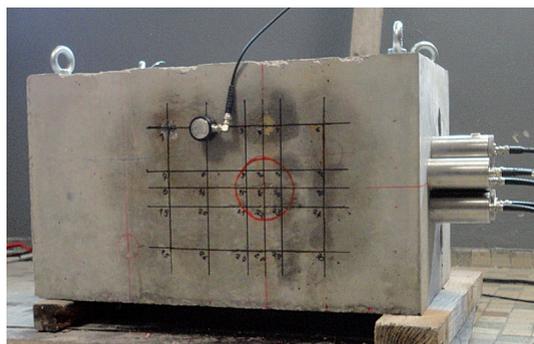
Doctorant :	Florian OUVRIER-BUFFET
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Benoît DURVILLE
Directeur de thèse :	Vincent GARNIER – LMA
Co-directeur de thèse :	Narintsoa RANAIVOMANANA - LMGC
École doctorale :	AMU / ED Mécanique, Physique, Micro- et Nanoélectronique
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 Alkali 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 et de localiser le plus précocement possible l'apparition de ces pathologies dans des massifs de béton épais. La particularité de ce travail est que le béton est un matériau hétérogène et atténuant. 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.

En 2017, des essais sur de petites éprouvettes (7 x 7 x 28 cm) atteintes de RSI ont permis de tester la sensibilité de différentes techniques de CND ultrasonores vis-à-vis de cette pathologie. Des analyses destructives de microscopie et de microfissuration ont également été réalisées. Il en ressort qu'à faible expansion (< 0.20%), la pathologie n'a pas créé d'endommagement dans ces éprouvettes et que de ce fait elle n'est pas détectable ni en AL ni en ANL. Ce travail a permis de montrer que de petites éprouvettes de laboratoire non contraintes ne sont pas représentatives de cas *in situ* de RSI où de l'endommagement peut survenir avant 0.20% d'expansion.

En 2018, un bloc de plus grande taille (40 x 40 x 70 cm) a été coulé. Il contient une boule de grès de 10 cm de diamètre simulant un béton endommagé localement. Le grès a été choisi car sa forte non-linéarité simule un béton atteint de RAG (la bibliographie montrant que la RAG est non-linéaire dès une faible expansion). A l'aide de ce bloc, une méthode de CND en ANL a été développée et a permis de détecter et localiser la boule.

En 2019, un bloc de taille 40x40x70 cm contenant un insert de béton réactif (pathologie RAG) a été coulé et constitue donc un cas test représentatif. Les résultats de cette dernière étape conditionneront l'auscultation de blocs ODOBA représentatifs de la pleine échelle (100 x 200 x 400 cm).



*Essai d'acoustique non linéaire visant à détecter la boule de grès (cercle rouge) noyé dans un bloc de béton de dimensions 40x40x70cm*

**Sujet de la thèse :****Durabilité des capteurs à fibres optiques destinés à la mesure des déformations des ouvrages en béton**

Doctorant :	Ismail ALJ
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSN-SRDS / SSyR / BEADS
Tuteur de thèse :	Quentin GRANDO
Directeur de thèse :	Karim BENZARTI – IFSTTAR
École doctorale :	Université Paris-Est / SIE
Financement de thèse :	IRSN / IFSTTAR

Que ce soit pour rationaliser les opérations de maintenance ou garantir la sécurité des ouvrages d'art et des centrales nucléaires, la surveillance des structures 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 pour toutes les solutions d'instrumentation. Les capteurs à fibres optiques (fo) distribués sont de plus en plus utilisés pour le suivi des déformations et de la température dans les structures en béton armé en raison des avantages offerts en termes de précision, de déport de la mesure sur de longues distances et de la faible intrusivité par rapport aux capteurs traditionnels. Les câbles fo sont généralement collés en parement ou noyés à l'intérieur de la structure en béton. En conditions de service, les câbles en parement sont exposés à l'environnement climatique extérieur alors que ceux insérés dans la structure sont soumis à l'alcalinité du béton. Cette thèse vise donc à étudier la durabilité des câbles fo destinés aux mesures réparties de déformation des structures en béton armé.

L'étude comporte un programme expérimental sur des petites éprouvettes instrumentées et exposées à des vieillissements accélérés représentatifs des applications considérées. Deux câbles fo du commerce ont été sélectionnés. D'une part, ces derniers ont été noyés dans des éprouvettes cylindriques en béton puis immergés dans une solution alcaline (10/12/2018) afin de simuler, de manière accélérée, l'effet de la solution interstitielle du béton sur l'interface câble/béton. D'autre part, les câbles ont été collés en surface de prismes en béton puis exposés à des cycles d'immersion/séchage dans l'eau (21/12/2018) et des cycles gel/dégel (11/12/2018) afin de simuler l'agressivité de l'environnement extérieur. Des essais d'arrachement câble/béton doivent être effectués à différentes échéances afin d'étudier l'évolution du transfert d'effort du béton vers le cœur de la fibre optique.



En parallèle, des blocs de béton du projet ODOBA ont été instrumentés au moyen de câbles fo noyés et collés en parement (les blocs ZA et IB). L'objectif est de démontrer l'aptitude de cette instrumentation pour la détection et le suivi à long terme des pathologies potentiellement rencontrées sur les enceintes des centrales nucléaires (réaction sulfatique interne : RSI, réaction alcali-granulat : RAG et couplage RAG/RSI).

*Instrumentation par fibre optique en surface du bloc ZA sur la plateforme ODE.*

➤ Mercredi 3 avril

16 h 30 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PARALLÈLE

### **Transfert des radionucléides dans l'environnement**

**Président : Bernard BONIN**

Directeur scientifique adjoint du CEA-DEN

Membre du CS de l'IRSN

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

**Audrey SOULOUMIAC** - Étude mécaniste et écophysiological du transfert du carbone 14 aux poissons.

**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.

**Alexandre FLOURET** - Modélisation dynamique de la disponibilité du césium dans le continuum sol-solution-plante : confrontation des modèles disponibles à des jeux de données expérimentaux contrastés.

**Sujet de la thèse :****Reconstitution, à partir d'archives sédimentaires,  
des concentrations et des sources en radionucléides 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>02 / 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</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>AMU / ED Sciences de l'Environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La nucléarisation des grands fleuves français au cours du siècle dernier est sujette à des préoccupations environnementales et sociétales particulièrement émergentes dans le contexte actuel des transitions énergétiques. Les archives collectées dans des zones d'accumulation sédimentaire des fleuves constituent de véritables témoins des pressions anthropiques auxquels les bassins versants ont pu être exposés. En effet, ces archives permettent de reconstituer les concentrations en divers contaminants et notamment en radionucléides émis par les installations nucléaires depuis plusieurs décennies.

Le Rhône et la Loire présentent de nombreuses industries nucléaires et un fonctionnement hydrosédimentaire très spécifique à chacun. Avec son chenal endigué et ses 19 barrages hydroélectriques, le Rhône est fortement anthropisé et draine des massifs alpins très érosifs. La Loire présente une succession de processus morphosédimentaires et de régimes hydrologiques très contrastés avec de nombreux barrages dans les têtes de bassins et un lit endigué dans son cours moyen.

Une archive a été collectée en aval de l'ensemble des installations nucléaires dans chacun de ces fleuves afin de reconstruire l'évolution des concentrations et l'origine des radionucléides des deux bassins versants. L'archive sédimentaire collectée sur le Rhône a été réalisée grâce à des mesures préalables par géoradar afin d'optimiser la localisation du carottage. La datation de cette archive s'est avérée complexe. En effet, les industries nucléaires, et notamment le centre de retraitement du combustible usagé de Marcoule, ont engendré, dès le début des années 60, des rejets de  $^{137}\text{Cs}$ . Ceux-ci masquent l'identification des traceurs chronologiques généralement utilisés pour la datation de ces objets : (1) le pic des retombées atmosphériques des essais nucléaires (1963) et (2) celui de Tchernobyl (1986).

Un modèle exploratoire de datation utilisant les chroniques de rejets des industries nucléaires, de débits et de concentrations en radionucléides acquises sur les matières en suspension dans le cadre de la surveillance conduite par l'IRSN, couplé à des équations de transport hydrosédimentaire et de dépôt est en cours de développement. Les premiers résultats permettent de proposer une datation de la carotte rhodanienne sur la période 1980 à nos jours. Ce modèle sera également appliqué à l'archive de la Loire, déjà datée à partir des traceurs conventionnels. La comparaison des résultats de la datation par les deux méthodes sur ce dernier hydrosystème permettra de valider le modèle de datation aux exutoires des fleuves nucléarisés.

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

---

Docteurant :	Audrey SOULOUMIAC
Date du début de la thèse :	02 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Tuteur de thèse :	Frédéric ALONZO
Directeur de thèse :	Olivier SIMON – IRSN
Co-directeur de thèse :	Jean-Christophe POGGIALE - MIO
École doctorale :	AMU / ED Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN / EDF

---

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 du  $^{14}\text{C}$  présent dans les cours d'eau.

Les modèles opérationnels actuels de transfert du  $^{14}\text{C}$  en milieu aquatique restent très simplistes puisqu'ils ne prennent pas en considération l'influence potentielle des variations de biodisponibilité du  $^{14}\text{C}$  intervenant au fil de la chaîne trophique. De plus de nombreux processus clés du métabolisme (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 la thèse est d'étudier le flux des isotopes 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 Energétique Dynamique (DEB) pour décrire le transfert du  $^{14}\text{C}$  entre les différents compartiments (eau, phytoplancton, zooplancton) et les poissons. Ces transferts seront modélisés chez la carpe commune, *Cyprinus carpio*, présente dans les rivières et fleuves français et dans la base de données des suivis radioécologiques pour le  $^{14}\text{C}$  et le poisson zèbre (*Danio rerio*) afin d'extrapoler ces données à d'autres espèces.

Dans un premier temps, le modèle DEB de *C. carpio* a été complété pour améliorer les prédictions de croissance et de masse. Dans un second temps le modèle DIB ("Dynamic Isotope Budget"), extension du modèle DEB appliqué en écologie fondamentale à l'analyse des isotopes stables ( $^{13}\text{C}$  et  $^{15}\text{N}$ ), sera adapté au cas du  $^{14}\text{C}$  via l'acquisition de données expérimentales sur les cinétiques d'ingestion, de défécation, d'assimilation, d'incorporation et de respiration du  $^{14}\text{C}$  dans les carpes en fonction de la forme biochimique du  $^{14}\text{C}$  (arginine, glucose, glycérol et carbonate).

**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**

<b>Docteurant :</b>	<b>Hamza CHAIF</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>09 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LR2T</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Laurent GARCIA-SANCHEZ</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>François LAFOLIE - INRA</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>AMU / ED Sciences de l'Environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / EDF</b>

---

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 car elle contrôle leur persistance en surface, leur disponibilité au transfert racinaire et leur migration verticale vers les nappes. En évaluation, sa quantification repose généralement sur le coefficient de partage (noté  $K_d$ ), qui suppose que la sorption est une réaction instantanée, linéaire et réversible. Mais ses hypothèses, très simplificatrices (sorption équilibrée et illimitée), ne sont pas toujours vérifiées et peuvent induire des erreurs dans l'estimation des temps de séjour des radionucléides dans les sols. Le modèle EK propose une nouvelle approche en supposant l'existence en quantités limitées de sites de sorption en équilibre avec la phase liquide et d'autres régis par des cinétiques. Cependant, cette approche alternative ne pourra être proposée en évaluation tant que ses paramètres et équations n'auront pas été étudiés à des échelles plus proches des conditions réelles.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la validité du modèle EK et l'applicabilité de ses paramètres déterminés au laboratoire à des situations réelles. Les radionucléides étudiés sont le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{60}\text{Co}$ . La méthode de travail retenue est d'étudier un même sol à l'aide de systèmes expérimentaux de complexité croissante : batchs, réacteurs à flux, mini-colonnes (5 cm) et colonnes (~20 cm).

En batchs, nous avons observé une isotherme de sorption du  $^{137}\text{Cs}$  à 48h de forme non-linéaire qui suggère l'existence de sites de sorption à forte affinité et faible capacité ainsi que des sites à faible affinité mais à plus forte capacité. En réacteurs à flux, nous avons observé des courbes de percée qui varient avec les débits et concentrations d'injection. Ces observations invalident le modèle  $K_d$  et sont plus favorables à l'application de l'approche EK. Ce modèle permet, avec un jeu de valeurs unique, de reproduire l'ensemble des comportements observés dans les conditions testées.

Des travaux expérimentaux sont en cours pour le  $^{60}\text{Co}$  (batchs, réacteurs) et pour le  $^{137}\text{Cs}$  (colonnes de sol). Les expériences en colonne seront décisives car elles permettront de tester les hypothèses du modèle EK en milieu poreux en se basant à la fois sur les flux (en sortie de colonne) et sur les stocks en place (les profils de contamination).

**Sujet de la thèse :****Modélisation dynamique de la disponibilité du césium dans le continuum sol-solution-plante : confrontation des modèles disponibles à des jeux de données expérimentaux contrastés**

<b>Doctorant :</b>	Alexandre FLOURET
<b>Date du début de la thèse :</b>	07 / 11 / 2016
<b>Laboratoire :</b>	PSE-ENV / SRTE / LR2T
<b>Tuteur de thèse :</b>	Laureline FEVRIER
<b>Directeur de thèse :</b>	Francois LAFOLIE – UMR EMMAH-INRA Avignon
<b>École doctorale :</b>	AMU / ED Science de l'environnement
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / région PACA

Le  $^{137}\text{Cs}$ , un radionucléide ayant une période de 30 ans, est communément retrouvé dans le sol après un accident nucléaire. De par ses propriétés de rétention et d'accumulation, le sol est à l'origine de transferts de ce radionucléide vers les compartiments de la chaîne trophique, entraînant in fine un risque potentiel pour la population. Les modèles utilisés pour prédire les quantités de  $^{137}\text{Cs}$  absorbées par les plantes depuis le sol reposent sur des hypothèses simples de transfert constant dans le temps, qui ne permettent pas de décrire les variabilités observées selon le type de sol et/ou de plante considérés.

L'objectif de cette thèse consiste à : I) mettre en évidence les paramètres principaux influençant cette variabilité et II) proposer un modèle de transfert simple et applicable de manière générique pour une grande variété de sols et de plantes.

Une série d'expériences a été réalisée afin d'obtenir un jeu de données caractérisant la distribution du  $^{137}\text{Cs}$  dans le continuum sol-plante, en fonction du temps. Trois sols naturels de caractéristiques physico-chimiques variées (sol argileux à pH acide, sol argilo-limoneux et sol sableux à pH basiques) et deux plantes (moutarde, millet) de capacités d'absorption contrastée du  $^{137}\text{Cs}$  ont été utilisés. Les expériences ont été conduites à l'aide de RHIZOtest®, dispositif permettant de maximiser le transfert racinaire du  $^{137}\text{Cs}$ , sur une durée de trois semaines. En parallèle, des expériences en batch ont été réalisées pour caractériser la disponibilité environnementale du  $^{137}\text{Cs}$ .

Les résultats montrent une grande variabilité du transfert entre les sols et les plantes. Selon la nature du sol sur lequel elle croît, une même plante absorbe ainsi entre 10 et 40% du  $^{137}\text{Cs}$  initialement dans le sol. La moutarde absorbe plus de  $^{137}\text{Cs}$  que le millet quel que soit le type de sol et le transloque plus efficacement dans ses parties aériennes. Enfin, les plantes tendent à épuiser le stock environnementalement disponible de  $^{137}\text{Cs}$  sans pour autant l'appauvrir totalement dans les conditions des essais.

Une confrontation de ces résultats à un modèle, permettant de décrire les interactions entre sol et la solution du sol, l'absorption à la plante et les cinétiques de ces processus est en cours. Cette modélisation permettra de :

- I) hiérarchiser les facteurs influençant le transfert sol-plante du Cs (propriétés physico-chimiques/capacité de rétention du sol vs caractéristiques physiologiques de la plante),
- II) proposer un modèle robuste permettant de rendre compte de la variabilité des transferts du  $^{137}\text{Cs}$  observés.



➤ Mercredi 3 avril

16 h 30 Salle Camargue

## SESSION PARALLÈLE

### **Comportement du combustible en situation accidentelle**

**Président : Jean-Michel BONNET**

Adjoint au directeur

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Thomas JAILIN** - Étude expérimentale et modélisation du comportement d'un tube de gainage lors d'un accident de réactivité en phase post-crise ébullition.

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

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

## Sujet de la thèse :

Étude expérimentale et modélisation du comportement d'un tube de gainage  
lors d'un accident de réactivité en phase post-crise ébullition

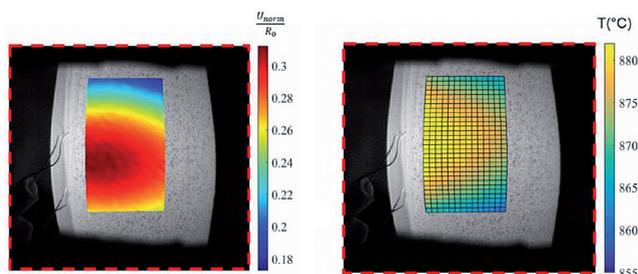
Doctorant :	Thomas JAILIN
Date du début de la thèse :	03 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / LE2M
Tuteur de thèse :	Jean DESQUINES, Vincent GEORGENTHUM
Directeur de thèse :	Marie-Christine BAIETTO – Laboratoire LaMCoS
Co-directeur de thèse :	Nicolas TARDIF – Laboratoire LaMCoS
École doctorale :	Université de Lyon / ED MEGA
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Lors de la phase post-DNB (*departure from nucleate boiling*) d'un accident RIA (*reactivity initiated accident*) les crayons de combustibles, en alliage de Zirconium, peuvent être soumis à des sollicitations thermomécaniques intenses. Des transitoires thermiques de plus de 1000°C/s jusqu'à des températures supérieures à 1000°C peuvent être enregistrés sur la gaine alors que celle-ci est soumise à une pression interne résultant d'un mélange de gaz de remplissage et de gaz de fission relâchés. Ces conditions induisent des déformations en ballonnement de la gaine susceptibles de mener à sa rupture. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermomécanique de la gaine sous de telles conditions de chargement.

Dans un premier temps, l'impact de transitoires thermiques élevés sur le changement de phase allotropique ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) du Zircaloy-4 a été étudié. Des essais de dilatométrie libre ont ainsi été réalisés sur des tronçons de gaine jusqu'à des vitesses de 2000°C/s. Ces essais ont permis d'identifier l'influence du transitoire thermique sur la cinétique de changement de phase du Zircaloy-4 à des vitesses de chauffe représentatives de celles rencontrées lors de la phase post-DNB d'un accident RIA.

Dans un deuxième temps, la plateforme expérimentale ELLIE, développée par D. Campello pour étudier le fluage des gaines lors de transitoires lents, a été significativement modifiée afin de pouvoir reproduire des essais de fluage semi-intégraux représentatifs de la phase post-DNB d'un accident RIA. Des transitoires thermiques de plus de 1500°C/s peuvent être appliqués sur des tronçons de gaine, à l'aide d'un système de chauffage par induction, alors que l'éprouvette est pressurisée à l'aide d'Argon. Le développement de mesures optiques a permis une acquisition couplée des champs 3D cinématique et thermique en surface de la gaine lors des essais (voir Figure). Ces essais ont mis en évidence un fort impact du transitoire thermique sur les propriétés thermomécaniques de la gaine dans le domaine biphasé et le domaine  $\beta$ .

La richesse des données obtenues par les méthodes de mesures de champs, couplée aux résultats de changement de phase obtenus par dilatométrie, permet l'identification de lois de comportement au fluage de la gaine par recalage par éléments finis (FEMU).



**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-RES / SEMIA / LIMAR
<b>Tuteur de thèse :</b>	Pierre RUYER
<b>Directeur de thèse :</b>	Pascale AUSSILLOUS – IUSTI CNRS
<b>École doctorale :</b>	AMU / ED Sciences pour l'ingénieur : Physique, Micro et Nanoélectronique
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Le contexte de cette thèse concerne un hypothétique accident d'insertion de réactivité (RIA) qui est initié par l'éjection d'une grappe de commande. Le combustible nucléaire d'un réacteur et le gaz de fission, initialement confinés au sein d'un crayon par un gainage cylindrique métallique, peuvent entrer en contact avec le fluide caloporteur en cas de rupture de cette gaine. La violence de l'interaction dépend notamment fortement du débit des fragments hors du crayon. La compréhension des phénomènes gouvernant cette cinétique 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 cette dynamique en se plaçant dans une configuration modèle par l'éjection des grains hors d'un cylindre pressurisé.

Premièrement, nous étudions l'influence de la géométrie interne sur le débit de vidange des particules en plaçant un fond incliné en bas d'un silo rectangulaire avec un orifice placé latéralement. En support à l'interprétation de ces 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.

Deuxièmement, nous avons étudié la vidange du silo assisté par de l'air pressurisé. Nous avons mis en évidence deux régimes d'écoulement selon les conditions expérimentales. Le régime quasi stationnaire a été observé pour une vidange du silo en imposant une pression constante du gaz au-dessus du milieu granulaire. Nous avons montré que le débit de vidange de particules respecte la loi de Beverloo en ajoutant le gradient de pression gazeuse au terme de gravité. Nous avons construit un modèle d'estimation de ce gradient grâce aux modèles d'Ergün et de Kozeny-Carman pour prédire le débit de vidange des particules comme du gaz. Le régime instationnaire a été observé pour une vidange du silo avec une rupture soudaine de l'orifice à haute pression ( $\approx 2,5$  bar). Nous observons que le jet de l'écoulement granulaire à l'orifice a une forme spécifique avec des instabilités aux premiers instants de vidange. Par ailleurs, les effets inertiels impactent le débit. Un premier mécanisme lié aux oscillations de pression est proposé pour décrire les instabilités de jet.

En perspective, un modèle numérique continu de l'écoulement diphasique est proposé pour interpréter les résultats expérimentaux d'une vidange avec rupture de l'orifice. Enfin, des essais de vidange au sein d'un liquide ont été réalisés et sont en cours d'analyse.

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

---

<b>Doctorant :</b>	Juan Antonio BLANCO
<b>Date du début de la thèse :</b>	15 / 10 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP / SNC / LN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Eric DUMONTEIL
<b>Directeur de thèse :</b>	Pablo RUBIOLLO – CNRS / IN2P3 / LPSC
<b>École doctorale :</b>	Université Grenoble Alpes / IMEP-2
<b>Financement de thèse :</b>	CNRS / IRSN

---

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 (GPR) 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 objectif 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 (des solides et des fluides) et la thermique.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un nouveau schéma numérique de couplage entre le code neutronique 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.

Plusieurs systèmes nucléaires ont été identifiés pour tester le couplage proposé. Entre eux, les expériences déroulées dans le réacteur SILENE au site Valduc du CEA et les transitoires avec la manipe de Godiva aux Etats Unis a Los Alamos National Laboratory (LANL) sont étudiés. Nombreux phénomènes physiques peuvent être énumérés dans ces situations, par exemple : écoulement compressible en deux phases, radiolyse au sein du combustible liquide et dilatations thermiques du combustible solide. L'application du modèle pour les études des hypothétiques accidents de criticité dans une piscine combustible est aussi prévue.

Tel qu'expliqué auparavant, l'implémentation numérique a été faite sur la plateforme OpenFOAM en C++ qui permet la modélisation de la mécanique de fluide, et en général de la mécanique des milieux continus avec la méthode de volume finis. En plus de la modélisation mathématique des phénomènes physiques, des études sur l'optimisation du temps de calcul avec une méthode Monte Carlo ont été faits au moyen de l'implémentation d'une méthodologie du type quasi-statique pour les transitoires neutroniques. Une première validation et la vérification du couplage contre données expérimentales et autres calculs couplés a été faite.

➤ la soirée de Mercredi 3 avril  
à 21 h 00 ➤ Espace bar





➤ Jeudi 4 avril

09 h 00 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Comportement des radionucléides dans l'atmosphère**

**Président : Nathalie LEMAITRE**

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Alexandre FIGUEIREDO** - Étude expérimentale de la photoréactivité d'iodo-carbones et de particules iodées.

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

**Oumar Telly BAH** - Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée.

**Alexis DÉPÉE** - Étude microphysique du lessivage des particules radioactives par les nuages : influence de la charge électrique des aérosols.

## Sujet de la thèse :

## Étude expérimentale de la photoréactivité d'iodo-carbones et de particules iodées

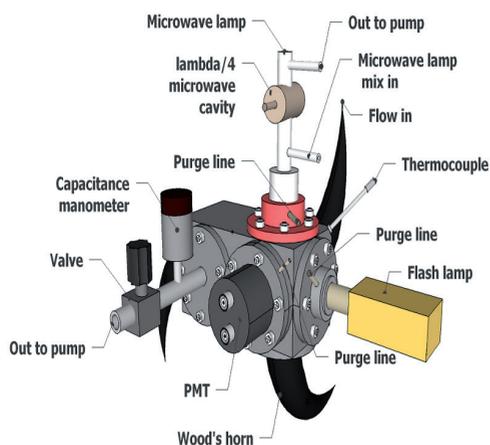
Docteurant :	Alexandre FIGUEIREDO
Date du début de la thèse :	09 / 10 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR
Tuteur de thèse :	Loïc BOSLAND
Directeur de thèse :	Rafal STREKOWSKI - Laboratoire Chimie Environnement
Co-directeur de thèse :	Henri WORTHAM - Laboratoire Chimie Environnement
École doctorale :	AMU / ED Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / Région PACA

Lors d'un accident survenant sur une installation nucléaire, des espèces radioactives, dont des espèces iodées gazeuses fortement radiotoxiques, peuvent être rejetées dans l'environnement. Les analyses de l'accident de Fukushima ont mis en évidence une incohérence entre les résultats de simulation et les mesures réalisées des dépôts de l'iode et par conséquent, la nécessité de prendre en compte la réactivité physico-chimique de l'iode dans l'atmosphère dans les outils de simulation. L'objectif de la thèse est donc d'améliorer la modélisation du comportement des espèces iodées dans l'atmosphère intégrée dans le code de dispersion atmosphérique CTM (*Chemistry Transport-Model*) via l'étude de la cinétique de 2 phénomènes :

Sous l'effet du rayonnement solaire, les espèces iodées gazeuses peuvent être décomposées et reformées en fonction des cycles jour-nuit, notamment via des processus d'oxydation. Toutefois, la décomposition des espèces gazeuses organo-oxygéné-iodées n'est pas bien modélisée ce qui conduit à prédire leur accumulation en phase gazeuse, ce qui n'est pas réaliste. L'étude de cinétiques réactionnelles de dégradation de composés organo-oxygéné-iodées avec les radicaux  $\text{OH}^\bullet$  et  $\text{O}^\bullet$  est donc réalisée avec un système VUV couplé à la fluorescence par résonance. Différentes familles d'organo-oxygéné-iodées ont été sélectionnées pour cette étude : acide iodobenzoïque ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{IO}_2$ ), acide iodoacétique ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{IO}_2$ ), iodooxetane ( $\text{C}_3\text{H}_5\text{IO}$ ), iodoethanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{IO}$ ). Leurs constantes cinétiques de disparition sont déterminées dans différentes conditions expérimentales.

Aussi, lors de son transport dans l'environnement, l'iode gazeux s'adsorbe à la surface des particules atmosphériques et est soumis à divers processus photochimiques pouvant mener à sa revolatilisation en phase gazeuse. Aujourd'hui, l'interaction de ces espèces iodées gazeuses avec les aérosols environnementaux n'est pas parfaitement connue et

pourrait impacter fortement le transport de l'iode gazeux ainsi que les conséquences radiologiques associées. En s'appuyant sur les études précédentes de SOCORRO *et al.*, 2015 et ZHANG *et al.*, 2010, un protocole expérimental a été développé afin de suivre la cinétique de photodégradation de l'iode adsorbé sur des particules au cours du temps. Les expérimentations se sont concentrées sur la détermination des temps de demi-vie de l'iode adsorbé sur les particules sous rayonnement solaire (simulé par une lampe Xénon). Pour cette étude, l'impact de l'humidité relative (0-80%) sera étudié. La phase gazeuse est analysée en temps réel par PTR-MS afin de suivre la variation des concentrations d'iode et des produits de dégradation.



Système VUV couplé à la fluorescence par résonance

## Sujet de la thèse :

Étude expérimentale des réactions de capture/désorption des iodes gazeux ( $I_2$ ,  $CH_3I$ ) sur des aérosols environnementaux

Doctorant :	Hanaa HOUJEIJ
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Anne Cécile GRÉGOIRE
Directeur de thèse :	Sophie SOBANSKA – ISM / L2EC
École doctorale :	Université de Bordeaux / ED Sciences chimiques
Financement de thèse :	IRSN / Région Nouvelle Aquitaine

**Introduction and objectives:** Iodine-131 released into the environment during severe nuclear power plant accident has a high radiological impact on human health<sup>1</sup>. Current post-accident management plans used to protect the public and to minimize the radiological impact of airborne fission products do not consider any chemical reactivity of gaseous iodine in the atmosphere. However, interaction between gaseous iodine compounds and aerosols can be a significant process for the atmospheric chemistry. In this context, this work aims at investigating the influence of atmospheric aerosols on the transport of gaseous methyl iodide.

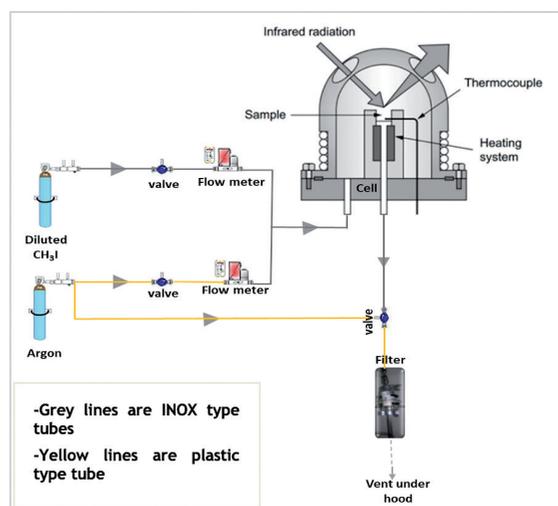
**Method and Results:** The experimental study focuses on the interaction between gaseous iodine ( $CH_3I$ ) and sea salt aerosols ( $NaCl$ ) in dry and humid conditions ( $R.H = 60-80\%$ ) at ambient temperature. The nature of this interaction was firstly investigated *in situ* by Infrared Spectroscopy (DRIFT). DRIFT results clearly evidenced adsorbed  $CH_3I$  on  $NaCl$  particles surface under both dry and humid conditions with a very low uptake and accommodation coefficients in the range of  $10^{-14}$  and  $10^{-6}$ , respectively. Associated kinetics of the adsorption is modelled using a first-order Langmuir adsorption isotherm, which fits very well the experimental data. It should be noted that there is no apparent desorption of  $CH_3I$ . DRIFT spectra exhibit some new bands for adsorbed products on the surface of dry and wet  $NaCl$  showing the formation of new products induced by  $NaCl$  surface.

**Status and perspectives:** Although the uptake and accommodation coefficients of  $CH_3I$  are quite low, additional products, not identified at that time which do not corresponds to the monomers and clusters of  $CH_3I$  and  $CH_3I-H_2O$ , are formed. These products can play a significant role in the cycling life of iodine in the atmosphere since they may be transported on  $NaCl$  surface particles. Thus, it is very important to understand the formation mechanism of these additional products. Theoretical calculations will help to identify these new products.

In order to assess the uptake of  $CH_3I$  on other inorganic salts ( $NaNO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ), experiments will be performed in a static reactor coupled with FTIR which monitors the decreasing of gaseous iodine phase (as the DRIFT technique is not adapted for IR-absorbant salts).

Next, open flow reactor will be developed to extend the experimental database with  $I_{2(g)}$ .

1. Lebel, L. S., Dickson, R. S. & Glowa, G. A. Radioiodine in the atmosphere after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *J. Environ. Radioact.* 151, 82–93 (2016).



**Sujet de la thèse :**

**Détermination expérimentale du dépôt par temps sec de l'iode moléculaire susceptible d'être émis dans l'environnement suite à un accident nucléaire majeur sur un réacteur à eau pressurisée**

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

En cas d'accident grave sur un réacteur nucléaire à eau pressurisée, l'iode ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{129}\text{I}$ ) peut être rejeté dans l'environnement sous différentes formes physico-chimiques : particulaires et gazeuses. Une fraction de l'iode émis se dépose sur les couverts artificiels et naturels dont les végétaux. De précédentes études ont montré qu'il existait 1 à 3 ordres de grandeurs d'écart sur les vitesses de dépôts secs de l'iode moléculaire gazeux dans l'environnement (N. Karunakara, 2018) et sans prise en compte des paramètres environnementaux. Pour comprendre ces écarts de valeurs, nous avons développé une méthodologie expérimentale de détermination de la vitesse de dépôt sec de l'iode stable ( $^{127}\text{I}$ ) gazeux dans l'environnement. Pour cela, de l'iode est émis depuis un générateur et des éprouvettes d'herbes (16 cm x 16 cm) sont placées à 3 m de la source d'émission et exposées aux dépôts atmosphériques pendant 30 minutes. Les masses d'iode collectées par les éprouvettes sont quantifiées, ainsi que les concentrations d'iode dans l'atmosphère au-dessus des éprouvettes pour en déterminer des vitesses de dépôt sec. Ces vitesses de dépôt sec ont varié entre 0,05 et 0,5 cm s<sup>-1</sup>. De plus, les résultats montrent qu'il existe une relation entre les vitesses de dépôt sec de l'iode (cm s<sup>-1</sup>) et les vitesses de frottement du vent (m s<sup>-1</sup>). Les résultats obtenus ont permis de bâtir un modèle de dépôt de l'iode gazeux qui sera couplé avec le modèle de dépôt des particules existant au laboratoire pour établir un modèle global. Ce dernier sera validé sur la Plateforme Technique IRSN La Hague (PTILH) soumise aux rejets d' $^{129}\text{I}$  de l'usine Orano. Pour cela, des prélèvements sur filtres et sur charbon actif sont réalisés tous les 15 jours et des prélèvements d'herbe (1 m x 1 m) tous les mois sur la PTILH. Ces prélèvements sont mesurés par spectrométrie gamma pour déterminer les concentrations d' $^{129}\text{I}$  dans les différentes matrices prélevées.

**Sujet de la thèse :****Étude microphysique du lessivage des particules radioactives 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
<b>Directeur de thèse :</b>	Andrea FLOSSMANN – LMPC
<b>École doctorale :</b>	Université Clermont Auvergne / ED 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. Aux échelles continentales, le dépôt des aérosols est essentiellement lié au lessivage par les nuages (*rainout*). Ma thèse a pour but d'améliorer la modélisation du *rainout* en étudiant l'influence des interactions électriques dans la capture de l'aérosol radioactif par les gouttelettes de nuage.

Un modèle théorique de capture d'aérosol par des gouttelettes de nuage a été développé pour en déduire un paramètre utilisé dans la plupart des modèles de nuage, de climat, de pollution, etc. : l'efficacité de collecte. Cette modélisation microphysique consiste en un suivi Lagrangien de millions de particules autour d'une gouttelette chutant à sa vitesse terminale. Cette méthode permet de prendre en considération les effets inertiels et électrostatiques, ainsi que le mouvement brownien des particules. Des matrices d'efficacité ont ainsi été établies par méthode Monte-Carlo pour des tailles et des charges de goutte et d'aérosol représentatives de l'environnement. Cette étude numérique montre que la charge électrique de l'aérosol radioactif induit une augmentation significative de sa collecte par les gouttelettes de nuage.

Ensuite, un banc d'essais a été conçu afin de confronter ce modèle microphysique aux données expérimentales encore inexistantes dans la littérature. Ce dispositif est une chambre cylindrique thermostatée où des microgouttelettes chutent à leur vitesse terminale dans un flux d'aérosols. Un générateur piézoélectrique est utilisé pour générer les gouttelettes monodispersées, tandis que leur charge est contrôlée par un anneau d'induction développé et qualifié durant la thèse. L'aérosol est constitué de fluorescéine et sa dispersion granulométrique est contrôlée par un analyseur différentiel de mobilité électrique. Pour charger les aérosols, deux dispositifs sont utilisés suivant la taille des particules. Les plus grosses sont chargées par un chargeur par champ que j'ai dimensionné, construit et qualifié. Pour les plus petites particules, un chargeur par diffusion est utilisé. En sortie de chambre, les gouttes sont séparées du flux d'aérosol pour en déduire une mesure d'efficacité de collecte par analyse fluorimétrique.

Dans cette dernière année de thèse, les mesures seront confrontées à mon modèle afin de mieux décrire les interactions électrostatiques dans le modèle DESCAM (*DEtailed SCAvenging Model*) qui permettra de modéliser un nuage depuis 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 dans les codes de calcul de l'IRSN.



➤ Jeudi 4 avril

10 h 40 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Dispersion atmosphérique**

**Président : Thierry BOURGOIS**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC** - Méthodes inverses 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.

**Ngoc Bao Tran LE** - Méta-modélisation et calibration statistique des paramètres d'entrée d'un modèle de dispersion atmosphérique appliqué sur l'accident de Fukushima.

## Sujet de la thèse :

**Méthodes inverses 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 / 2017
Laboratoire :	PSE-SANTE / SESUC / BMCA
Tuteur de thèse :	Olivier SAUNIER
Directeur de thèse :	Marc BOCQUET - CEREА
École doctorale :	Université Paris-Est / SIE
Financement de thèse :	IRSN

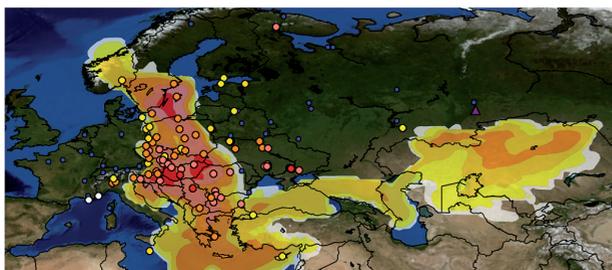
En cas de rejet radioactif accidentel, l'IRSN utilise des modèles de dispersion atmosphérique pour évaluer les conséquences radiologiques sanitaires et environnementales. La précision des résultats fournis par les modèles de dispersion est très dépendante de la qualité des champs météorologiques et du terme source : localisation, quantité émise, évolution temporelle et composition isotopique du rejet.

Les méthodes de modélisation inverse qui consistent à coupler les modèles de dispersion atmosphérique avec les mesures environnementales s'avèrent efficaces dans l'évaluation du terme source. L'IRSN a développé une méthode inverse basée sur une approche variationnelle qui a été appliquée sur l'accident de Fukushima à partir des mesures de débit de dose ou d'activité volumique. La méthode a été adaptée pour localiser la source en cas d'événements de détection de radionucléides d'origine inconnue.

Les méthodes variationnelles sont appropriées pour une utilisation opérationnelle puisqu'elles sont capables de fournir rapidement une estimation optimale du terme source mais présentent des limites lorsqu'il s'agit d'obtenir une quantification des incertitudes de ce terme source. Les méthodes de modélisation inverse de type bayésienne visent à échantillonner la distribution des paramètres décrivant le terme source et permettent donc d'obtenir une caractérisation complète de la source.

En septembre 2017, de faibles niveaux de concentrations de  $^{106}\text{Ru}$  d'origine inconnue ont été observés en Europe. Bien que les niveaux de concentrations observés étaient sans conséquences tant pour la santé que l'environnement, l'étendue des détections suggérait que le terme source était important. Dans le cadre de la thèse, des méthodes de Monte-Carlo par Chaînes de Markov (MCMC) basées sur l'inférence Bayésienne ont été utilisées pour la reconstruction du terme source. Les distributions des paramètres décrivant la source et les erreurs d'observations sont présentées et discutées. Les résultats montrent que les chaînes comportant un nombre restreint de paramètres échantillonnent des distributions cohérentes avec la source reconstruite en utilisant des méthodes variationnelles.

De plus, le temps de calcul requis par la méthode MCMC est compatible avec une utilisation opérationnelle. Cependant, lorsque le nombre de paramètres à échantillonner est plus important, les chaînes ont davantage de difficultés pour converger. En particulier, les chaînes peuvent être piégées dans des minimums locaux pendant la phase de recherche de la localisation de la source. Cela peut être expliqué par la répartition inégale des observations sur le continent Européen.



Pour surmonter ces difficultés, des méthodes bayésiennes plus avancées ont été explorées et appliquées afin d'accélérer la convergence de l'algorithme MCMC.

**Sujet de la thèse :****Méta-modélisation et calibration statistique des paramètres d'entrée  
d'un modèle de dispersion atmosphérique appliqué sur l'accident de Fukushima**

<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-SANTE / SESUC / BMCA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Irène KORSAKISSOK</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Vivien MALLET – INRIA Paris</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Centre / ED Sciences Mathématiques</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

À l'IRSN, les modèles de dispersion atmosphérique sont développés et utilisés pour estimer les conséquences sanitaires et environnementales suite à un rejet accidentel des radioéléments dans l'atmosphère. Ils calculent la concentration des radionucléides dans l'air et le dépôt au sol d'où sont déduites des évaluations de dose, qui sont utilisées pour recommander des actions de protection de la population. Cependant, ces évaluations contiennent de fortes incertitudes provenant des données d'entrée : prévision météorologique (vitesse et direction du vent, pluie...), terme source (quantité rejetée, composition isotopique, date et durée, hauteur de rejet) ; mais aussi de certains paramètres du modèle (vitesse de dépôt, coefficient de lessivage...).

L'objectif de la thèse est la quantification d'incertitudes de ces paramètres en utilisant les méthodes de calibration statistique. Il s'agit d'attribuer une densité de probabilité à chaque variable d'entrée incertaine et de caler ces densités en utilisant des observations disponibles. Cette étude s'applique sur la catastrophe nucléaire à Fukushima avec le modèle IdX, issu de la plate-forme opérationnelle C3X. Dans la procédure de calibration, nous utilisons les observations radiologiques de concentration, dépôt et débit dose, collectées au Japon.

La première étape est de définir les données d'entrée et leurs perturbations. Ici, nous utilisons l'ensemble météo de 50 membres provenant du centre européen de prévision (ECMWF en anglais). L'écart type de cet ensemble est supposé représenter les incertitudes de la prévision météorologique. Nous avons perturbé la météo en rajoutant à la moyenne d'ensemble un pourcentage de l'écart type de l'ensemble. Pour le rejet, la perturbation est effectuée par combinaison linéaire de poids aléatoire de six termes sources issus de la littérature de Fukushima.

Les méthodes de calibration demandent un grand nombre de simulations, non compatibles avec le temps de calcul du modèle complet. La construction d'un méta-modèle, c'est-à-dire une approximation mathématique du modèle initial, est donc nécessaire. Nous utilisons deux méthodes d'interpolation : fonctions de base radiales et krigeage (processus gaussien).

Les méta-modèles sont ensuite utilisés dans toute la procédure de calibration. D'abord, une optimisation déterministe a été réalisée. L'objectif est de retrouver le jeu de données d'entrée qui minimise l'écart modèle-mesure, sur des indicateurs comme la RMSE (*Root Mean Square Error*). Ensuite, une calibration probabiliste a été appliquée pour retrouver des densités de probabilité des entrées (facteur de la météo et d'autres paramètres). Une méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov a été utilisée pour caler les densités de 14 paramètres d'entrée.



➤ Jeudi 4 avril

11 h 20 Salle Les 3 Fontaines

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Neutronique**

**Président : Hugues DELORME**

Professeur de neutronique à l'EAMEA Cherbourg

Membre du CS de l'IRSN

**Clément JEANNESSON** - Développement de nouvelles méthodes pour le calcul des sections efficaces dans le domaine des résonances non résolues.

**Léa TILLARD** - Étude de l'impact des options de gestion du Plutonium et des Actinides Mineurs.

## Sujet de la thèse :

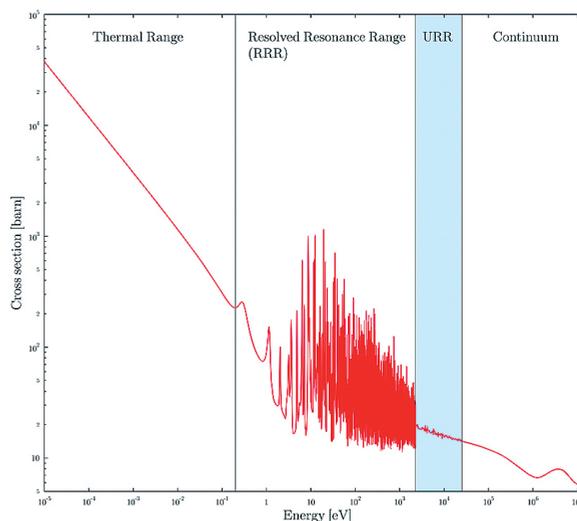
**Développement de nouvelles méthodes pour le calcul des sections efficaces  
dans le domaine des résonances non résolues**

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

Neutronics computations, which are widely used for criticality safety studies and reactor physics applications, rely on nuclear data that describe neutron-matter interactions. Investigating the quality of the nuclear data is important to assure safety, and is the first step of any calculation. At IRSN evaluation and processing of nuclear data are looked upon in the Neutronics Laboratory (LN). 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 this nuclear data processing capability to all energy regions. In particular in the so-called *unresolved resonance range*, this is the subject of this PhD.

Among nuclear data, cross sections are functions of the incident neutron energy that express the probability that a particular reaction occur. They play a major role in describing the neutron-target interaction. At some values of the energy, in the epithermal range (depending on the target nuclide), resonances that cannot be experimentally distinguished but structures in the cross section are still observed. This particular energy domain is called the unresolved resonance range (URR), where parameters, from which the cross section can be derived (resonance widths and energy) are only given as averaged values. Consequently, cross sections can only be computed based on probabilities. Indeed, the probability tables approach is a preferred methodology used in the URR.

The methods used to produce probability tables are based on Monte-Carlo algorithms, in which statistical sets of resonances parameters are sampled in the URR. Then, these parameters are used to reconstruct cross sections on the basis of the R-matrix theory. The distributions from which the resonances are sampled come from early work from Wigner and Porter in the 50's, and its current implementation in most existing codes does not take into account level correlations. At present time, a module to generate 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), and makes use of several techniques of reconstruction, and correlation.



**U235 total cross section at T= 293.6K**

**Sujet de la thèse :****Étude de l'impact des options de gestion du Plutonium et des Actinides Mineurs**

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

La France arrive à un tournant décisionnel en ce qui concerne l'évolution de son parc électronucléaire dont une cinquantaine de réacteurs dépassera 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 ? L'une des options envisagées 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). Les simulations de scénarios électronucléaires sont un moyen d'analyser et de comparer l'impact de différentes stratégies d'évolution de parc sur les flux de matières et les inventaires (plutonium, actinides mineurs...) mis en jeu à chaque étape du cycle du combustible.

L'objectif de la thèse est de développer les outils nécessaires à la simulation, avec le code CLASS (*Core Library for Advanced Scenario Simulation*), de scénarios de transition d'un parc actuel vers un parc intégrant des RNR-Na-CFV jusqu'à une phase de sortie du nucléaire. Pour cela, deux nouveaux modèles prenant en compte les hétérogénéités de ce type de cœur ont été implémentés. Ils utilisent des réseaux de neurones comme prédicteurs de données physiques afin de construire, d'une part, les combustibles neufs à charger dans les RNR-Na-CFV et d'effectuer, d'autre part, de très nombreux calculs d'évolution de ces différents combustibles. Ces modèles nécessitent l'utilisation de bibliothèques composées de plusieurs centaines de calculs Monte-Carlo évoluant effectués à l'aide du couplage de codes MCNP-VESTA. La précision de ces modèles, et donc les erreurs induites par les prédicteurs, est directement liée à la qualité des bibliothèques générées. Après une étude détaillée du système (poids des barres, effet de vidange, ...), la précision de ces calculs Monte-Carlo évoluant a été calibrée afin que l'erreur sur le flux soit d'environ 1‰ et celle sur le  $k_{\text{eff}}$  inférieure à 50 pcm, avec un temps de calcul raisonnable. Ainsi, *in fine* dans le code CLASS, l'erreur sur l'évolution des inventaires des principaux actinides est d'environ 1%, tandis que l'erreur sur la prédiction du  $k_{\text{eff}}$  est de l'ordre de grandeur de la précision statistique.

L'impact des RNR-Na-CFV sur la gestion du plutonium et des actinides mineurs a été étudié sur des scénarios simplifiés. Ils montrent la complexification des cycles de combustibles lors de l'intégration des RNR-Na-CFV dans un parc de Réacteurs à Eau Pressurisé utilisant des combustibles UOX et MOX. Ils mettent également en évidence l'importance de la composition du combustible neuf d'un RNR-Na-CFV sur son comportement qui peut être, pour un même design, isogénérateur, surgénérateur ou incinérateur de plutonium.



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

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

- **Kossi Dovéné ABALO** - Analyse de la relation entre le risque de cancer et l'exposition aux rayonnements ionisants lors de procédures de cardiologie interventionnelle en pédiatrie, au sein de la cohorte COCCINELLE.
- **Abdellah AMRI** - Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs.
- **Marine BOUDIAS** - Développement de supports hautement sélectifs pour l'étude de la migration des contaminants radioactifs dans l'environnement.
- **Clément BROSSARD** - Traitement par thérapie cellulaire de la cystite radique chez le rat.
- **Elsa CANTABELLA** - Analyse des effets neurologiques des rayonnements ionisants chroniques à faible dose : des réponses moléculaires aux effets cognitifs.
- **Robert CAULK** - Micro-macro modelling by Discrete Elements Method (DEM) of the long-term behaviour of shaft seals under hydraulic-gas loading.
- **Hugues DELATTRE** - Vents extrêmes et exceptionnels - Caractérisation, Modélisation et Projection future pour différents niveaux du réchauffement global.
- **Adrien DELAVAL** - Transfert des radionucléides dans un continuum fleuve-mer.
- **Elizabeth DUFOURCQ SEKATCHEFF** - La radiosensibilité des gamètes chez *C.elegans* : un élément déterminant de la reprotoxicité radioinduite ?
- **Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU** - Étude de la production d'hydrogène par la corrosion anoxique des aciers sous irradiation gamma.
- **Noémie GUIRANDY** - Évaluation des effets reprotoxiques et de leur transmission à la descendance chez le poisson modèle *Danio rerio* après irradiation gamma chronique.
- **Ségolène LADAIGUE** - Étude des interactions entre monocytes et cellules endothéliales dans un contexte de radiothérapie.
- **Léo MACE** - Impact de l'inhalation de particules de tungstène sur le système nerveux central : effets sur la neuroinflammation et conséquences sur la neurogénèse olfactive chez le rat.
- **Fiiia NURMINEN** - Probabilistic fault displacement hazard analysis – Improved methodology and applications.
- **Mélody PALLU** - Études des doses pour le personnel navigant de l'aviation civile liées aux flashes gamma terrestres et autres phénomènes électriques atmosphériques.
- **Loïc QUEVAREC** - Compréhension des mécanismes impliqués dans la réponse évolutive de populations (*Caenorhabditis elegans*) exposées à des rayonnements ionisants.
- **Rihab SASSI** - Rupture dynamique 3D sur des géométries de failles complexes pour étudier les aléas rupture de surface et mouvement sismique en champ proche.
- **Ayedah TARIQ** - Développement d'un capteur à fibre optique pour la mesure *in situ* du pH de bétons.

**Sujet de la thèse :**

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

**Doctorant :** Kossi Dovéné ABALO  
**Date du début de la thèse :** 01 / 10 / 2018  
**Laboratoire :** PSE-SANTE / SESANE / LEPID  
**Tuteur de thèse :** Estelle RAGE  
**Directeur de thèse :** Dominique LAURIER - IRSN  
**École doctorale :** Université Paris-Saclay / ED Santé Publique  
**Financement de thèse :** IRSN

---

En France, environ 6 500 à 8 000 enfants naissent chaque année avec une malformation cardiaque. Ces malformations congénitales sont généralement diagnostiquées et traitées par des procédures de cardiologie interventionnelle (PCI). Si l'utilisation de ces PCI en pédiatrie a permis des progrès incontestables dans le diagnostic et le traitement des cardiopathies, elles engendrent aussi une exposition aux rayonnements ionisants (RI). Or il est particulièrement important de considérer les effets d'une irradiation médicale chez les enfants du fait de leur grande sensibilité aux RI et de leur longue espérance de vie compatible avec le développement de pathologie radio-induite.

La cohorte COCCINELLE est une cohorte de 19 000 enfants ayant bénéficié d'un acte de cathétérisme cardiaque, avant l'âge de 16 ans, en France entre 2000 et 2013. L'objectif de cette thèse est d'évaluer le risque de cancer solide et de leucémie associé à l'exposition aux RI lors des PCI réalisées au cours de l'enfance. L'estimation des doses reçues, la quantification du risque ainsi que l'analyse de la relation dose-réponse et de l'existence de facteurs modifiants éventuels constitueront les grandes étapes de cette thèse.

Une étude bibliographique préalable a été conduite en vue d'une méta-analyse en interrogeant les grandes bases de données scientifiques afin de retrouver les travaux publiés sur les risques de cancer après exposition médicale aux RI à visée diagnostique et/ou thérapeutique dans le cadre de PCI comme le cathétérisme cardiaque, pendant l'enfance.

Au total 1 640 articles ont été retrouvés à partir des différentes bases de données : PubMed/Medline (n=318), Scopus (n=199), Web of Science (n=399), Embase (n=626), Global Health (n=45) et à partir des références (n=53). Après élimination des doublons (n=181), 1 459 articles ont été revus sur la base de leurs titres et résumés. Les articles pertinents (n=154), ont fait l'objet d'une lecture complète. Parmi eux, 114 articles ont été exclus (car ils ne remplissaient pas les critères d'inclusion), 40 ont été inclus dans l'analyse qualitative dont une vingtaine dans l'analyse quantitative.

Un premier bilan issu de cette méta-analyse permet d'observer que le scanner, la radiographie conventionnelle et le cathétérisme cardiaque sont les examens les plus abordés par les auteurs tandis que les leucémies, les tumeurs cérébrales et les cancers solides sont les événements les plus étudiés.

Les travaux sont en cours et les recherches doivent être poursuivies afin de déterminer le niveau de risque global associé à l'exposition médicale aux RI chez les enfants soumis à des PCI et aux autres examens d'imagerie médicale.

## Sujet de la thèse :

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

Docteurant :	Abdellah AMRI
Date du début de la thèse :	02 / 10 / 2018
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / UEMIS
Tuteur de thèse :	Zakaria SAADI
Directeur de thèse :	Rachid ABABOU - IMFT
École doctorale :	Institut Nationale Polytechnique de Toulouse ED Sciences de l'Univers, de l'environnement et de l'espace
Financement de thèse :	IRSN / European Joint Programming – H2020

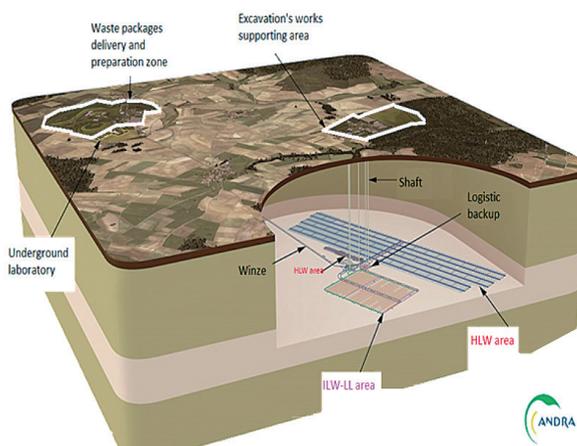
Au voisinage d'un site de stockage géologique profond des déchets radioactifs, des gaz, et essentiellement de l'hydrogène sont générés par la corrosion anaérobie des composants en acier des colis et par la radiolyse de l'eau. Après fermeture du stockage, la montée en pression de cette phase gazeuse et la migration de l'hydrogène pourraient ralentir la saturation en eau des barrières ouvragées et par conséquent créer des perturbations, telles que la fracturation de la roche hôte ou des barrières ouvragées, ainsi que l'ouverture des interfaces scellement-roche hôte. Ce qui peut contribuer à la diminution de l'efficacité de confinement du stockage.

Afin de quantifier l'effet de cet écoulement diphasique, l'UEMIS dispose d'un code massivement parallélisé (TOUGH2-MP, LBNL, Berkeley, USA) pour développer des modèles diphasiques bi-composants à différentes échelles spatiales (alvéole, module, site). L'objectif de la thèse est d'améliorer les capacités d'évaluation de la migration des gaz au sein d'une telle installation en utilisant le code TOUGH2-MP. Il s'agira en particulier de déterminer l'incertitude sur (i) le calcul du temps de resaturation du stockage et (ii) le calcul des pressions d'hydrogène atteintes dans les alvéoles, leur influence sur le calcul de l'effet piston de l'hydrogène et l'impact de ce dernier sur le transport des radionucléides dans les barrières ouvragées et dans la roche hôte (CO<sub>x</sub>).

Il s'agit notamment d'implémenter et de tester dans le code TOUGH2-MP l'ensemble des phénomènes physiques non pris en compte dans les anciens modèles de stockage géologique profond, listés comme suit :

- la pression d'entrée de gaz non nulle (significative) dans le modèle de pression capillaire / saturation d'un composant poreux (argilite saine et fracturée par l'excavation, bentonite, béton) ;
- le phénomène d'hystérésis engendré par des cycles d'imbibition et de drainage ;
- l'effet de la pression capillaire sur la loi de Henry ;
- la présence initiale d'air ;
- la modélisation hydromécanique des interfaces ;
- la dépendance du terme source à la saturation en eau.

À ce stade de la thèse, seuls les phénomènes i) et ii) ont été étudiés. Nous présentons i) l'importance de la pression d'entrée dans la caractérisation hydrodynamique du CO<sub>x</sub> (Voir projet CIGEO à Bure), et son impact sur le calcul de la pression de gaz dans le cadre de l'expérience PGZ1 (Perturbation induite sur les gaz) menée par l'Andra dans le laboratoire souterrain de Bure et ii) des résultats préliminaires sur la caractérisation de l'hystérésis du CO<sub>x</sub> au vue d'une modélisation future.



## Sujet de la thèse :

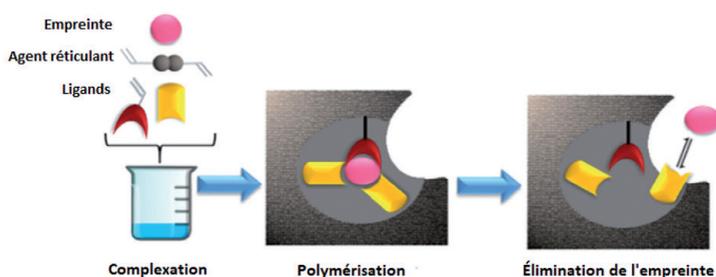
Développement de supports hautement sélectifs pour l'étude de la migration des contaminants radioactifs ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) dans l'environnement

Doctorant :	Marine BOUDIAS
Date du début de la thèse :	05 / 11 / 2018
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Tuteur de thèse :	Alkiviadis GOURGIOTIS
Directeur de thèse :	Nathalie DELAUNAY – ESPCI Paris / LSABM
École doctorale :	Sorbonne université / ED Chimie physique et chimie analytique
Financement de thèse :	IRSN / LSABM / LPSTA / Triskem

Le Ra-226 et le Cs-137 sont deux radionucléides qui occupent une place particulière sur le plan radiologique. En raison de leurs propriétés chimiques, leurs voies métaboliques sont respectivement similaires à celles du calcium et du potassium et ils peuvent donc contribuer à augmenter la dose interne. Afin de contrôler ce risque d'exposition chronique, il est nécessaire de mieux comprendre la dynamique biogéochimique et les processus de transfert de ces radionucléides entre les différents compartiments de la biosphère, notamment entre les zones d'accumulation et de transfert. Cependant, la quantification dans les zones de transfert (eau porale, systèmes racinaires, etc.) comporte de nombreux défis : faibles volumes d'échantillons (< 10mL), matrices complexes, concentrations en Ra-226 et en Cs-137 en-dessous des limites de détection instrumentales. L'analyse de ce type de matrice nécessite donc la mise en œuvre de méthodes de traitement de l'échantillon performantes, couplées à des méthodes d'analyse très sensibles. Les méthodes de traitement de l'échantillon décrites dans la littérature sont souvent multi-étapes, chronophages, non suffisamment sélectives et non adaptées à de faibles volumes d'échantillons.

Par conséquent, l'objectif de ce travail de thèse est de développer de nouveaux supports d'extraction afin de purifier et préconcentrer ces deux radioisotopes, en vue de leur analyse par ICP-MS (Spectrométrie de Masse à Plasma à Couplage Inductif). Dans ce but, deux approches de synthèse seront comparées. Une approche conventionnelle, consistant à greffer à la surface d'un support solide de nouvelles molécules extractantes de type macrocycle, très spécifiques des ions ciblés. En parallèle, la fabrication de supports hautement sélectifs basés sur la technologie des polymères à empreintes ioniques (IIP), sera expérimentée pour la première fois pour l'analyse du radium et du césium.

Après optimisation des protocoles d'extraction et caractérisation des différents supports synthétisés (sélectivité, rendement d'extraction, capacité, application à des échantillons réels, etc.), les supports les plus performants pour chacun des radionucléides seront miniaturisés, rendant possible l'analyse d'échantillons de l'ordre du  $\mu\text{L}$ , voire l'automatisation complète du processus analytique.



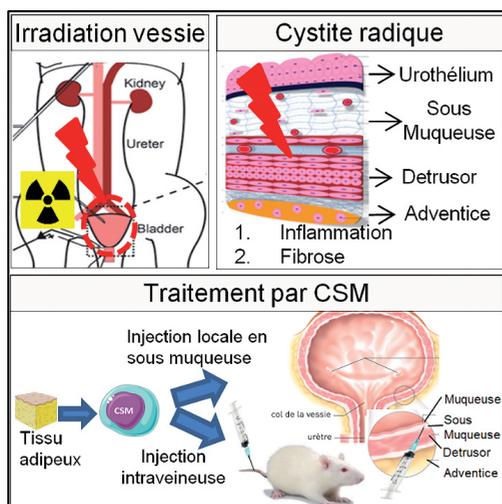
## Sujet de la thèse :

## Traitement par thérapie cellulaire de la cystite radique

Docteurant :	Clément BROSSARD
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2018
Laboratoire :	PSE-SANTE / SERAMED / LRMed
Tuteur de thèse :	Alain CHAPEL
Directeur de thèse :	Alain CHAPEL - IRSN
École doctorale :	Sorbonne université / ED Physiologie, physiopathologie et thérapeutique
Financement de thèse :	IRSN

Ce sujet de thèse s'intègre dans l'axe-programme [D]3[P]7 de recherche menés par l'IRSN qui vise à développer des approches expérimentales, cliniques et épidémiologiques sur les pathologies induites par les rayonnements ionisants. Cette thèse est dans la continuité de l'étude des traitements par thérapie cellulaire des séquelles des radiothérapies de la sphère abdominopelvienne dont les deux pathologies majeures sont la rectite (rectum) et la cystite (vessie) radique. Cette dernière se caractérise par une inflammation chronique donnant lieu à une fibrose avec de nombreux effets secondaires (douleurs, urgence, hémorragie, fistule...). La cystite radique concerne 5 à 10% des patients traités par radiothérapie externe pour des cancers de la zone pelviens, ce qui représente 9000 à 18000 patients par an en France.

La thèse se divise en deux grands axes. Le premier axe vise à créer un modèle de la cystite radique chez le rat en irradiant l'intégralité de la vessie tout en minimisant l'impact sur les tissus environnant. Ce modèle sera caractérisé aux niveaux transcriptomiques, protéiques et histologiques. Le deuxième axe de la thèse vise à utiliser des cellules souches mésenchymateuses (CSM) afin de limiter voir de reverser la cystite radique dans sa phase chronique. Les précédents travaux du laboratoire sur la rectite radique ont permis de démontrer que les CSM permettent de reverser l'inflammation chronique et la fibrose après irradiation.



Dans le cadre de cette thèse, la vessie a été irradiée à 20, 30 ou 40 Gray et suivis sur des temps de 3, 4 et 6 mois. Une analyse de l'expression des gènes montre un profil en faveur de l'inflammation chronique et l'hypoxie à 6 mois. L'observation des coupes de vessie colorées en hématoxyline / éosine / safran montrent une désorganisation de l'épithélium vésicale (urothélium) à 6 mois, avec une diminution de son épaisseur et de possibles lésions vasculaires mais pas encore de fibrose.

Ces premiers résultats montrent la pertinence du modèle de la cystite radique. L'analyse de la cinétique permettra de caractériser l'évolution de la fibrose. Dans un second temps nous pourrons mettre en place le traitement de cette pathologie par CSM.

**Sujet de la thèse :****Analyse des effets neurologiques des rayonnements ionisants chroniques à faible dose :  
des réponses moléculaires aux effets cognitifs**

<b>Doctorant :</b>	Elsa CANTABELLA
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSE / ENV / LECO
<b>Tuteur de thèse :</b>	Olivier ARMANT
<b>Directeur de thèse :</b>	Christelle ADAM-GUILLERMIN - LECO
<b>École doctorale :</b>	AMU / ED Sciences de l'Environnement
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

Les effets à long terme des expositions chroniques à faibles doses des rayonnements ionisants (RI) sur les écosystèmes restent largement méconnus. Des études sur des populations d'oiseaux à Tchernobyl démontrent une diminution du volume crânien avec le débit de dose, suggérant un impact significatif sur les capacités cognitives des vertébrés sur le long terme. Des résultats similaires sont observés sur des macaques après l'accident de Fukushima. Ces résultats sont en partie confirmés par des études de laboratoire réalisées sur des rongeurs, montrant qu'une exposition prénatale aux RI réduit le nombre de progéniteurs et de neurones différenciés, diminue la complexité du réseau dendritique et peut conduire à des déficits de mémoire et des perturbations du comportement. La génotoxicité des RI est décrite chez le poisson zèbre. Toutefois, ces études portent sur des embryons, à des expositions majoritairement aiguës et n'intègrent pas l'évaluation des mécanismes impliqués au niveau de l'encéphale. Cette dernière est nécessaire puisque l'intégrité du système nerveux central s'inscrit dans des processus majeurs tels que la survie, la reproduction et le comportement.

Ce projet propose d'étudier l'impact des RI chroniques à faibles doses sur le système nerveux central du poisson zèbre, organisme dont la neurogénèse adulte est abondante. Des paramètres moléculaires (dommages à l'ADN, apoptose, qRT-PCR, mRNaseq) et cellulaires (analyses in situ d'ARN et immunocytochimie) seront analysés et mis en relation avec des paramètres individuels intégrateurs comme l'anxiété et le comportement social.

Les poissons (6-8 mois) seront exposés à des débits de doses de 50 $\mu$ Gy/h et 0,5mGy/h durant 40 jours dans l'installation MICADO'LAB. Le choix des débits de dose se justifie par des résultats préliminaires de RNaseq et une volonté de se rapprocher des recommandations pour la protection des écosystèmes (10 $\mu$ Gy/h). Les effets des RI seront évalués au niveau du cerveau antérieur (télencéphale et diencéphale). L'étude portera sur différentes échelles d'organisation de fonctions biologiques majeures comme la prolifération et la différenciation cellulaires, la neurotransmission et le système neuroendocrinien au niveau des cellules souches neurales, des neurones matures et l'étude du comportement.

Ce projet permettra d'approfondir les connaissances mécanistiques des effets des RI sur le cerveau, organe essentiel à la survie. Il contribuera à évaluer la radiosensibilité de marqueurs tant au niveau moléculaire que comportemental. Enfin, ce projet de thèse est une première approche pour évaluer les effets des expositions aux RI chroniques à de faibles doses sur le long terme et leur impact possible sur la dynamique des populations.

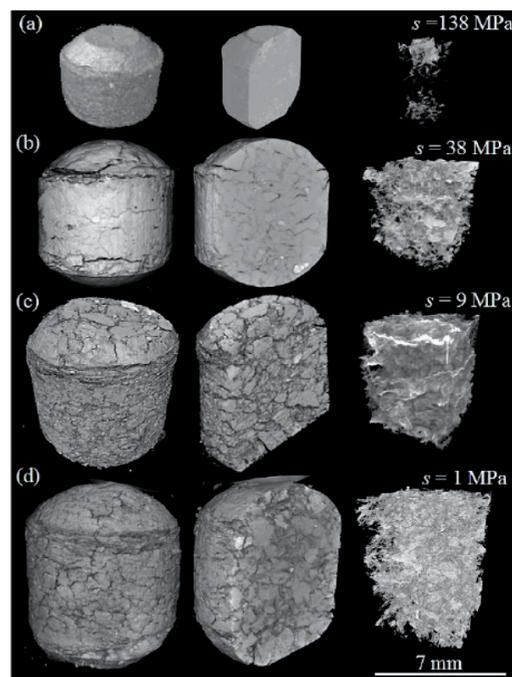
## Sujet de la thèse :

**Micro-macro modelling by Discrete Elements Method (DEM) of the long-term behaviour of shaft seals under hydraulic-gas loading**

Docteurant :	Robert CAULK
Date du début de la thèse :	13 / 12 / 2018
Laboratoire :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	Bruno CHAREYRE - CNRS / UJF / G-INP, UMR 3S-R
Ecole doctorale :	UMR 3S-R
Financement de thèse :	CCSN (Canada)

Vertical sealing systems of a deep geological disposal are one of the key elements in the containment of this facility, since they constitute the main potential pathway between the nuclear wastes and biosphere. Understanding migration processes of gas produced by metallic corrosion, microbial degradation and radiolysis of water through these sealing systems is of great importance for performance assessment and long-term evolution of such facilities. One of candidate materials of these seals consist of a mixture of swelling clays (Na-montmorillonite) in the form of a polydisperse assembly of highly compacted pellets and crushed pellets, in a strongly desaturated initial state (initial suction larger than 100 MPa). In order to investigate the hydromechanical behavior of the mixture at macro and microstructural scales under hydraulic and gas loadings, the Institute for Radiation protection and Nuclear Safety (IRSN) have launched a series of in situ and laboratory tests (small scale tests combined to x-ray microtomography, CT observations) Within Sealex and Vseal projects. One major result is under free swelling driven by vapour transport, compacted clay pellets reveal intricate crack patterns (Molinero, 2018).

This work aims to gain insights into the complex behaviour of this multi-scale material during asymmetric hydraulic and gas loadings. Following a multiscale approach, the first objective is to build a discrete element based framework for the examination of MX80 clay pellet crack patterns developed during free swelling. Within the framework, the clay pellet is discretized by discrete elements that are connected by cohesive elastic plastic contact laws. Contact stiffness's and discrete element volumetric strain both evolve according to an empirically based function of suction reported by Darde (2018) and Molinero (2018) respectively. Suction is determined by a pressure saturation curve obtained for MX80 clay and the partially saturated pore pressures are modelled using a Pore Finite Volume scheme. Numerically simulated spatial fracture distributions are compared to experimental measurements and CT-scan imagery reported by Molinero (2018). Results indicate that model refinements may be necessary including the consideration of microstresses, micro-macro porosity fluid fluxes, and void ratio changes.



*Cracks network of pellets at different suction. Molinero (2018)*

## Sujet de la thèse :

**Vents extrêmes et exceptionnels - Caractérisation, Modélisation et Projection future  
pour différents niveaux du réchauffement global**

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

Afin de considérer l'aléa « vent », toute construction se base sur les normes Eurocodes qui s'appuient sur les cartes des vents réalisées par le CSTB en 2005 sans examen particulier de la variabilité climatique et son évolution future. Lors de la prise en compte de l'aléa « vent » pouvant exercer des contraintes physiques sur les bâtiments et les ouvrages, le risque à considérer est quantifié en fonction de la zone où se situe l'ouvrage.

Les cartes de l'annexe nationale de l'Eurocode présentent les vitesses de vent cinquantennales estimées à partir d'une centaine de stations d'observation disposant de seulement vingt ans de mesure et considèrent principalement les phénomènes de grande échelle.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer la représentativité de l'approche actuelle pour couvrir les variations décennales des phénomènes de vents ainsi que la prise en compte des phénomènes de petite échelle. De surcroît, les périodes de retour très grandes (> 50 ans) ont besoin d'être définies et quantifiées pour le dimensionnement d'ouvrages spécifiques ou la démonstration de sûreté des installations nucléaires.

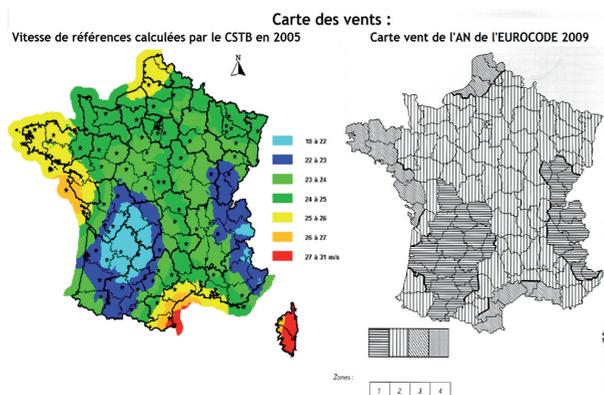
Cette thèse est co-encadrée par l'IRSN et le CSTB qui ont un intérêt commun avec l'élaboration d'un guide « vent et neige » pour le dimensionnement des installations nucléaires et une réévaluation des cartes vent de l'Eurocode. Les travaux de cette thèse se concentrent sur :

- la recherche d'éventuelle tendance dans les vitesses de vents extrêmes,
- la caractérisation de chaque phénomène venteux sur le territoire pour mieux les prendre en compte,
- l'évolution de l'aléa dans le futur.

Les premiers travaux en cours se basent sur l'exploitation de réanalyses à haute résolution du Centre européen pour les prévisions météorologiques (ECMWF). Leurs fines résolutions

(~30km) et leurs capacités à représenter les phénomènes de vent sur de plus longues périodes (1950 à 2016) fait de ces réanalyses un bon outil pour l'étude des vents extrêmes.

Enfin, plusieurs pistes permettant de sonder le devenir de l'aléa dans un climat futur sont envisagées et seront retenues suivant les phénomènes identifiés. Ces méthodologies comprendront l'utilisation d'un Modèle global de climat LMDZ fourni par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD).



**Sujet de la thèse :****Transfert des radionucléides dans un continuum fleuve-mer**

<b>Doctorant :</b>	<b>Adrien DELAVAL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LRTA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline DUFFA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Olivier RADAKOVITCH - IRSN</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>AMU / ED Géosciences de l'environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / région PACA</b>

Le Rhône constitue une source importante de radionucléides anthropiques à la Mer Méditerranée de par les installations sur son linéaire. La contamination de ces milieux y est un risque permanent et ubiquiste qu'il s'agit d'être en mesure de caractériser et de maîtriser au mieux. Une solution à cette caractérisation passe par la capacité des modèles numériques à prédire la dispersion des radionucléides en milieu continental et marin en situation d'urgence.

L'IRSN dispose du logiciel CASTEAUR pour le linéaire fluvial et du logiciel STERNE pour la mer Méditerranée. Ces modèles simplifiés doivent induire le minimum d'erreur dans les approximations. La compréhension des transferts dans la zone réactionnelle que constitue l'interface fleuve/mer est donc d'une importance stratégique.

En effet, pour de nombreux radionucléides le transfert du fleuve vers la mer se fait sous forme adsorbée sur les particules en suspension mais cette spéciation n'est pas définitive. A l'embouchure le milieu s'enrichit en cations (Ca, Na, K...) avec la salinité, les radionucléides qui ont un comportement d'élément métallique et qui sont faiblement adsorbés ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,...) peuvent être désorbés par des processus d'échange cationique.

Ces travaux visent à développer une approche modèle-terrain pour aboutir à une modélisation réaliste du transfert de radionucléides dans un continuum fleuve-mer. Le site d'étude est le corridor rhodanien et le delta du Rhône en mer.

**Les principaux objectifs sont :**

- L'amélioration de l'outil de modélisation fluvial CASTEAUR, en intégrant des données de terrain qui permettent une représentation concrète du Rhône
- L'établissement de scénarios types (localisation amont-aval des rejets, différents types de RN, variations des débits crues vs étiages, vents on-shore off-shore)
- Réaliser des prélèvements à l'estuaire et des expériences en laboratoire pour évaluer l'effet du mécanisme de désorption sur les radionucléides
- Prendre en compte le mécanisme de désorption et le phénomène de biseau salé pour assurer la cohérence en termes de données entrée-sortie pour les deux modèles utilisés : sur le fleuve et en mer

**Les premiers résultats montrent :**

- CASTEAUR restitue correctement les débits supérieurs ou égaux au débit moyen du Rhône. Pour des débits inférieurs, l'influence des barrages est plus importante et n'est pas encore prise en compte.
- La bibliographie indique une valeur nécessaire et suffisante de salinité pour amorcer la désorption à l'estuaire.
- Deux campagnes de terrain organisées en mars et juin 2019 permettront les premières mesures de césium dissous à l'interface pour vérifier cette hypothèse et préciser le mécanisme de désorption.

**Sujet de la thèse :****La radiosensibilité des gamètes chez *C.elegans* :  
un élément déterminant de la reprotoxicité radioinduite ?**

<b>Doctorant :</b>	Élizabeth DUFOURCQ SEKATCHEFF
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSE-ENV / SRTE / LECO
<b>Tuteur de thèse :</b>	Sandrine FRELON & Catherine LECOMTE-PRADINES
<b>Directeur de thèse :</b>	Simon GALAS – IBMM
<b>École doctorale :</b>	Université de Montpellier / ED Sciences Chimiques et Biologiques pour la Santé
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

L'environnement est continuellement exposé aux rayonnements ionisants (RI) naturels (rayonnements cosmiques et telluriques) et issus des activités anthropiques (centrales nucléaires en condition accidentelle, cycle du combustible, rejets des activités médicales et militaires). Pour évaluer les risques associés à une exposition chronique aux RI, il est nécessaire de comprendre les effets radio-induits de la molécule aux écosystèmes. Concernant les espèces environnementales, des recherches ont montré chez plusieurs invertébrés, dont le nématode *C.elegans*, une diminution de la reproduction (nombre de descendants notamment) après irradiation chronique. Ce projet s'inscrit dans la compréhension des mécanismes gouvernant cette reprotoxicité radio-induite.

Après irradiation chronique, des travaux récents ont montré que la gamétogénèse semblait impactée chez *C. elegans*, organisme hermaphrodite des sols. En effet, au niveau cellulaire et moléculaire ont été observés une diminution du nombre de spermatozoïdes, un arrêt de la division des cellules germinales (ainsi que la modulation de la quantité de plusieurs protéines liées à la reproduction, e.g. les vitellogénines impliquées dans le transport des lipides et la maturation des ovocytes (thèses A. Buisset-Goussen et C. Dubois). Ce projet de recherche s'attachera à approfondir nos connaissances sur la radiosensibilité respective des gamètes mâles et femelles.

Pour cela, nous adopterons une approche intégrée, de l'individu à la molécule, en cherchant à identifier i) le stade de développement le plus critique vis-à-vis de cette reprotoxicité, ii) la radiosensibilité différentielle des gamètes et iii) les voies de régulations impliquées dans la réponse aux RI, dont la contribution sera validée *in vivo*.

Concrètement, i) les nématodes seront irradiés jusqu'à différents stades de développement (prolifération, différenciation et maturation des gamètes), ii) une approche par croisement de souches mutantes (mutants masculinisés et féminisés) sera réalisée de manière à irradier d'une part les individus mâles et d'autres part les individus femelles et iii) nous nous appuyerons sur les données de transcriptomiques et protéomiques acquises précédemment (thèses C. Dubois et R. Guédon) et des analyses morphologiques des gamètes.

Les résultats attendus sont la caractérisation des mécanismes moléculaires et cellulaires de la reproduction impliqués dans la réponse aux rayonnements ionisants. Ces travaux contribueront *in fine* à la compréhension de la radiosensibilité des espèces et à la détermination de marqueurs précoces pour une meilleure évaluation du risque environnemental.

**Sujet de la thèse :****Étude de la production d'hydrogène par la corrosion anoxique des aciers  
sous irradiation gamma**

---

<b>Doctorant :</b>	Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU
<b>Date du début de la thèse :</b>	15 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSN-RES / SCA / LECEV
<b>Tuteur de thèse :</b>	Charles WITTEBROODT / Hortense DESJONQUERES
<b>Directeur de thèse :</b>	Gérard BALDACCHINO - CEA
<b>École doctorale :</b>	Université Paris-Saclay / 2MIB
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

Le concept de stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde est étudié et développé en vue d'isoler les déchets HA-MAVL et de protéger l'Homme et son environnement.

En France, le principe d'un tel stockage repose sur le concept de « multi-barrière » qui entraînera l'introduction de grands volumes de matériaux métalliques. Plusieurs dizaines d'années après la fermeture du stockage, la corrosion anaérobie de ces éléments métalliques provoquera un dégagement d'hydrogène gazeux. Simultanément, le rayonnement ionisant émis par certains déchets conduira à la radiolyse de l'eau présente dans la formation géologique. Cette dernière réaction entraînera, d'une part, la production d'hydrogène gazeux supplémentaire, et, d'autre part, la création d'espèces oxydoréductrices susceptibles de modifier les conditions chimiques du milieu ainsi que les processus de corrosion des aciers.

Le but de ce travail de thèse est donc d'apporter de nouvelles données expérimentales relatives à la corrosion du fer sous irradiation gamma en milieu aqueux anoxique, et à la production d'hydrogène qui lui est associée. Il vise, dans un premier temps, à irradier avec un rayonnement gamma ( $^{60}\text{Co}$ ) une cellule contenant des échantillons métalliques immergés dans un volume d'eau déionisée et désaérée, et à mesurer en continu la production d'hydrogène (par chromatographie en phase gazeuse) durant différentes phases (corrosion pure, corrosion sous irradiation, corrosion post-irradiation). Ainsi, le suivi de la production d'hydrogène en fonction du temps nous renseignera sur les vitesses de corrosion caractéristiques de ces différentes phases.

Ensuite, la cellule sera transférée en boîte à gants anoxique pour prélever les échantillons métalliques et la solution aqueuse. La surface des échantillons corrodés sous irradiation sera caractérisée par spectroscopie Raman, DRX et MEB afin d'identifier les produits de corrosion formés. En parallèle, les caractéristiques chimiques de la solution (pH, Eh,  $[\text{Fe}^{2+}]$ ,  $[\text{Fe}^{3+}]$ ) seront déterminées, de même que les quantités de peroxyde d'hydrogène produites par la radiolyse de l'eau, dans le but de comprendre les mécanismes impliqués dans le processus de corrosion. Pour être plus proche des conditions représentatives d'un stockage géologique, des essais supplémentaires seront également réalisés. Ils viseront à faire varier des paramètres comme la composition chimique de la solution d'immersion et/ou la température. En parallèle, des essais mettant en jeu des échantillons de fer préalablement corrodés seront effectués. Enfin, des travaux de modélisation seront réalisés via le code Chemsimul afin d'interpréter les données relatives au phénomène de la radiolyse de l'eau pour les différentes conditions expérimentales testées.

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Noémie GUIRANDY</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SRTE / LECO</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Olivier SIMON</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Olivier SIMON - IRSN</b>
<b>Co-directeur de thèse :</b>	<b>Patrice GONZALEZ - UMR EPOC</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>AMU / ED Sciences de l'environnement</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

L'irradiation gamma externe, à faible dose peut avoir des effets reprotoxiques chez les organismes aquatiques. Ces effets directs et ceux transmis à la descendance pourraient modifier la structure des populations à long terme. Cependant, peu d'études ont été réalisées sur les effets de l'irradiation de plusieurs générations chez les vertébrés aquatiques. Les objectifs de cette thèse concernent l'étude des performances de reproduction du poisson modèle *Danio rerio* et l'identification de marqueurs moléculaires des effets reprotoxiques après exposition multigénérationnelle. Une partie est dédiée à l'évaluation de l'héritabilité des effets dommageables observés après irradiation gamma.

Dans un premier temps, une étude à forte dose (50 mGy h<sup>-1</sup>) a été réalisée afin d'observer des effets sur la reproduction. Les effets ont été évalués sur : la gamétogenèse, en irradiant des individus adultes pendant 10 jours, correspondant à la durée de l'ovogenèse, et l'embryogenèse, en irradiant la descendance pendant 4 jours. Suite à cette première expérimentation, il n'a été observé aucun effet sur les performances reproductrices des adultes, avec un succès reproducteur de 100 % pour les conditions témoins et irradiés. Cependant la descendance générée n'était pas viable. Une augmentation importante de la mortalité a été observée au cours du temps pour la condition irradiée, avec un pourcentage à 24 heures post-fertilisation (hpf) et 96hpf de, respectivement, 50 % et 94 %. La condition témoin présentait à ces temps-là, un pourcentage de mortalité, respectivement, de 9 % et 15 %. De nombreuses malformations ont également été observées sur cette descendance, notamment des œdèmes cardiaques. En parallèle, des embryons issus de parents non exposés ont été irradiés dans les mêmes conditions (50 mGy.h<sup>-1</sup>, 4 jours), sans augmentation de la mortalité (12 % à 24 hpf). Ainsi, l'étude va être orientée plus particulièrement sur la compréhension des effets sur la gamétogenèse et la transmission des dommages chez la descendance.

Plusieurs hypothèses sont à prendre en compte pour expliquer les effets observés sur la descendance : (1) transmission d'effets épigénétiques (méthylation de l'ADN) ; (2) altération de l'ADN des gamètes (génotoxicité) ; (3) mauvaise constitution des réserves (défaut de protéolyse de la vitellogénine) ; (4) concentration en cortisol maternelle trop élevée et transmise à la descendance. Ces marqueurs restent à analyser. Les paramètres testés pourront alors être utilisés en tant que biomarqueurs dans le cadre d'une prochaine expérimentation plus représentative des conditions d'environnements contaminés. Ainsi, une étude multigénérationnelle (2 générations exposées) pourra être réalisée à faible dose (0.05, 0.5, 5 mGy h<sup>-1</sup>) dans l'installation MICADO'LAB.

**Sujet de la thèse :****Étude des interactions entre monocytes et cellules endothéliales  
dans un contexte de radiothérapie**

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

---

La radiothérapie est un traitement externe locorégional des cancers. Ce traitement induit des effets secondaires au niveau des tissus sains exposés aux rayonnements ionisants situés à proximité des tumeurs, ce qui limite son potentiel thérapeutique.

L'une des conséquences de l'irradiation est le recrutement chronique et délétère de cellules immunitaires dans les tissus sains irradiés dont les mécanismes sous-jacents restent peu connus. En particulier, les monocytes, des cellules immunitaires innées, font partie des premiers effecteurs en cas de dommage tissulaire causés par l'irradiation. Comprendre les modalités d'entrée de ces cellules dans le tissu après irradiation est un enjeu fondamental pour de futures stratégies thérapeutiques qui pourraient viser à limiter l'infiltrat immunitaire afin de protéger les tissus sains, ou encore favoriser cet infiltrat pour l'élimination des tumeurs.

Au sein du tissu vasculaire, l'endothélium participe à l'initiation et au développement des toxicités induites par les radiations. *In vivo*, les cellules endothéliales irradiées interagissent davantage avec les leucocytes circulants. *In vitro*, l'augmentation radio-induite de N-glycosylations hautement mannosylées à la surface des cellules endothéliales est impliquée dans l'arrêt des monocytes sur ces cellules, première étape du passage des cellules de la circulation sanguine vers les tissus. L'objectif de cette thèse est d'identifier des acteurs moléculaires endothéliaux modulateurs de l'infiltrat du système immunitaire inné post-irradiation.

Dans ce but, le rôle d'un gène codant une mannosidase (*man1c1*), impliqué dans l'expression des glycosylations hautement mannosylées, sur le recrutement monocytaire est actuellement questionné. La stratégie implique des approches *in vitro* grâce à des tests d'adhésion en flux et de migration trans-endothéliale de monocytes. Des études après extinction partielle par *siRNA* ou après surexpression du gène *man1c1* sont en cours. Des premiers résultats montrent une augmentation de l'arrêt des monocytes après inhibition de *man1c1*, en accord avec une implication de ce gène dans le recrutement des monocytes. Le rôle d'une autre glycosylation (Sialyl Lewis X) de l'endothélium après irradiation est étudié par immunofluorescence et cytométrie en flux. Les premiers résultats, à confirmer, indiquent que ce motif n'est pas surexprimé après irradiation. D'autres types de molécules comme les chimiokines CX3CL1 et CCL2 pourraient avoir une importance dans l'arrêt des monocytes après irradiation. Le rôle de chaque acteur moléculaire sera étudié *in vitro* puis *in vivo* chez la souris notamment par microscopie intra-vitale. Des stratégies d'inhibition de ces cibles pourront alors être utilisées pour limiter les toxicités tissulaires radio-induites dans des modèles murins disponibles dans le laboratoire.

**Sujet de la thèse :**

**Impact de l'inhalation de particules de tungstène sur le système nerveux central : effets sur la neuroinflammation et conséquences sur la neurogénèse olfactive chez le rat**

**Docteurant :** Léo MACE  
**Date du début de la thèse :** 02 / 10 / 2018  
**Laboratoire :** PSE-SANTE / SESANE / LRTOX  
**Tuteur de thèse :** Chrystelle IBANEZ  
**Directeur de thèse :** Laurence ROY - IRSN  
**École doctorale :** Université Paris-Saclay / ED Innovation thérapeutique :  
du fondamental à l'appliqué  
**Financement de thèse :** IRSN

---

L'impact des expositions par inhalation de polluants particulaires sur le système nerveux central soulève des enjeux sanitaires préoccupants. Le cerveau représenterait une cible directe notamment *via* l'implication de la voie d'entrée par le nerf olfactif. L'hypothèse d'un lien entre la pollution particulaire et la survenue de maladies neurodégénératives a été émise *via* le mécanisme de neuroinflammation. Des données expérimentales ont, en effet, confirmé une activation des cellules microgliales et un retard de maturation des neurones après inhalation de particules fines.

Dans les installations nucléaires, les contaminations sont souvent causées par des aérosols particulaires représentant un risque potentiel pour la santé des travailleurs ou des populations vivant à proximité des sites. Le tungstène est un contaminant présenté comme émergent dans la littérature. Les situations d'exposition en lien avec les activités nucléaires concernent certaines opérations de démantèlement (découpes d'alliages de métaux) et la future installation ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). En effet, une production importante de particules est attendue dans la chambre à vide lors du fonctionnement du réacteur Tokamak, entraînant une possible dispersion de particules aérosolisées de tungstène pendant les maintenances, ou en situation accidentelle en cas de perte de vide.

Ce projet a pour but d'étudier les effets induits par l'inhalation de particules de tungstène sur le cerveau. Des rats mâles adultes seront exposés par inhalation en mode aigu et répété sur 1 semaine en système *nose-only* permettant une exposition spécifique des voies aériennes supérieures. Les temps d'analyse post-exposition s'échelonnent de 4 heures à 28 jours. La métrologie et la caractérisation de l'aérosol polydispersé généré est en cours. Cette phase est essentielle pour la maîtrise et une connaissance précise de la granulométrie des particules auxquelles seront exposés les animaux et pour faire le lien avec les effets biologiques observés.

Le premier objectif sera de confirmer l'hypothèse d'un impact neuroinflammatoire d'une exposition au tungstène par l'étude de l'activation des astrocytes et des cellules microgliales. Le deuxième objectif portera sur l'étude du lien entre une modulation de la réponse inflammatoire et la différenciation des cellules souches neurales dans la zone de migration rostrale du cerveau. Des analyses de biologie moléculaire, d'intégrité cellulaire et anatomique seront réalisées.

Ce projet pourrait contribuer aux recherches portant sur les effets de l'exposition à des particules métalliques sur le cerveau et sur le lien entre les processus neuroinflammatoires et l'intégrité neuronale. Nos résultats permettraient à moyen terme, d'améliorer les règles de (radio)protection.

**Sujet de la thèse :****Probabilistic fault displacement hazard analysis  
– Improved methodology and applications**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Fiiia NURMINEN</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SCAN / BERSSIN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Stéphane BAIZE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Paolo BONCIO - Università di CHIETI (Italia)</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Università di CHIETI (Italia)</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / U. CHIETI</b>

---

This PhD project unites the principles and methods of geophysics to earthquake geology in order to estimate and model the fault rupture hazard and amount and distribution of co-seismic fault displacement on seismically active areas. The main targets of the PhD project are (1) to improve the methodological procedure of probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), (2) to create an open-source, user-friendly software for fault displacement hazard assessment, and (3) to apply the model to the chosen areas. The previous research groups have each concentrated their analysis mainly on principal fault (PF) rupturing of one main rupturing type kinematics (normal, thrust or strike-slip), and they have used different types of approaches to analyze the distribution of surface rupturing, especially what it comes to off-fault, or so-called distributed surface rupturing (DR) away from the principal fault trace. The scope of this PhD project is to come up with a uniform methodology for the analysis of surface faulting for all three types of earthquakes utilizing and developing further the datasets and approaches of previous researchers.

The project starts with bringing together the various datasets of faulting parameters of historical surface rupturing earthquakes. The four key parameters needed in model building are (1) probability of surface rupturing on PF, (2) dislocation distribution along PF, (3) probability of DR occurrence and (4) dislocation distribution on DRs as a function of distance from PF. The first two have been studied well by previous research groups, thus the emphasis of this PhD work is in two latter parameters. During the project, the statistically most robust approach for analysing the data that is incomplete and discontinuous by its nature is chosen by testing various ones. The obtained parameters are used in building up a mathematical modelling tool, which plots the spatial distribution of the expected dislocation, or the probability of exceeding a certain level of dislocation, on a map around the known fault trace. Within this project detailed fault displacement hazard characterization and PFDHA maps are produced for three selected sites. This kind of information is vital for land-use management and construction engineering in vicinity of active faults. The PhD project is executed in joint project of Università degli Studi "G. d'Annunzio" (Chieti, Italy) and IRSN, in collaboration with Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Italy) and California Geological Survey (USA).

**Sujet de la thèse :****Études des doses pour le personnel navigant de l'aviation civile liées aux flashes gamma terrestres et autres phénomènes électriques atmosphériques**

---

<b>Doctorant :</b>	Mélody PALLU
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSE-SANTE / SDOS / LDRI
<b>Tuteur de thèse :</b>	François TROMPIER
<b>Directeur de thèse :</b>	Sébastien CELESTIN – Université d'Orléans
<b>École doctorale :</b>	Université d'Orléans / ED EMSTU
<b>Financement de thèse :</b>	Air France

---

Les flashes gamma terrestres (TGF) sont des événements produits dans des orages communs, dans la moyenne atmosphère (~12 km) et sont associés aux éclairs intra-nuages, qui sont les plus fréquents. L'accélération d'électrons dans les orages à des vitesses relativistes, induit ensuite un rayonnement X de freinage, sous forme de flash de durée 50  $\mu$ s–1 ms, pouvant atteindre une énergie de plusieurs dizaines de MeV. Le faisceau d'électrons à l'origine du flash serait susceptible de délivrer des doses approchant 100 mSv aux altitudes de vols (Dwyer *et al.*, JGR, 115, D09206, 2010).

Les *Gamma ray Glows* (« Glows ») sont des élévations du rayonnement de fond pendant des durées > 1 seconde et pourraient également contribuer à l'exposition des personnels navigants (PN). De plus, on considère aujourd'hui que les Glows sont des événements fréquents ; on estime que > 8% des orages en produisent (Kelley *et al.*, Nat. Comm., 6, 7845, 2015).

Les TGF et les Glows pourraient ainsi constituer une source supplémentaire d'exposition pour les PN, en plus du rayonnement cosmique qui est actuellement pris en compte pour leur évaluation dosimétrique. Même si la fréquence et la localisation de ces événements extrêmes n'est pas encore bien connue, cette source d'exposition, si elle était significative devrait être ajoutée ou être du moins évaluée.

À ce jour, seules des simulations numériques ont été utilisées pour estimer leur contribution au niveau de dose potentiellement reçu par les PN du fait de la difficulté d'obtenir des données mesurées. Dans ce travail de thèse, on se propose d'estimer précisément cette dose additionnelle due à ces événements en se basant sur deux approches complémentaires : l'étude théorique et la simulation numérique de ces phénomènes et risques associés, et la mise au point d'un programme de mesure et l'exploitation des données collectées.

Le travail de simulation numérique, déjà débuté, basé sur un modèle de propagation des photons dans l'atmosphère (Østgaard *et al.*, JGR, 113, A02307, 2008), permettra d'évaluer l'influence des paramètres des TGF (diamètre du faisceau d'électrons, intensité, altitude du point source, etc.) sur la dose reçue à proximité de la source.

Les données proviendront de différentes campagnes : mesures avion dans des systèmes orageux : campagne ANR-EXAEDRE (septembre-octobre 2018, analyse en cours), monitoring en continu à bord d'avions de ligne Air France, mesures en vols ballon dans des cellules orageuses des doses, rayonnement gamma, et champ électrique (projet CNES-OREO), données du satellite TARANIS (CNES, lancement 2020).

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

<b>Docteurant :</b>	Loïc QUEVAREC
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PRP-ENV / SRTE / LECO
<b>Tuteur de thèse :</b>	Jean-Marc BONZOM
<b>Directeur de thèse :</b>	Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN
<b>École doctorale :</b>	AMU / ED Sciences de l'environnement
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

Évaluer les effets d'une exposition à long terme aux rayonnements ionisants à l'échelle populationnelle constitue un champ de recherche important. Les changements environnementaux, telle qu'une radio-contamination d'un écosystème, s'accompagnent de nouvelles pressions de sélection sur les populations. Ces pressions peuvent se traduire par un déclin démographique brutal, qui, s'il n'est pas accompagné d'une réponse adaptative efficace des populations, conduit à leur extinction. Au fil des générations, le tri par la sélection naturelle de ces populations peut conduire à une augmentation de la résistance au contaminant. Dans ce cas, les populations peuvent se rétablir démographiquement et persister. Mais l'adaptation à une contamination donnée peut également engendrer un coût en termes de capacité démographique (production de descendants...) ou encore, une plus forte vulnérabilité face aux stress environnementaux. Pour une évaluation rigoureuse des risques écologiques d'une contamination de l'environnement, il est donc important de comprendre et de quantifier les réponses évolutives des populations, et les conséquences de ces changements évolutifs sur le maintien à long terme des populations.

L'objectif de ce projet est d'étudier expérimentalement les réponses évolutives d'une population d'une espèce animale modèle, le nématode *Caenorhabditis elegans*, exposée à des rayonnements ionisants pendant plusieurs générations (au moins 20 générations).

Ce modèle animal se prête à ce type d'étude car, entre autre, il est de petite taille (1 mm), son cycle de vie est court (3 jours à 20°C), son génome est séquencé et il s'élève très facilement au laboratoire. Au fil des générations, les effets démographiques (taux de reproduction, taille de la population, sex-ratio...), génétiques (taux de mutation, changement de la structure génétique...) et phénotypiques (réserve énergétique, système immunitaire...) seront quantifiés. Concernant les aspects génétiques, le génome des populations sera séquencé au fil des générations, ce qui permettra d'appréhender l'évolution du taux de mutation (cartographie des SNP - Single Nucleotide Polymorphism -) et d'estimer la perte ou non de diversité génétique (richesse haplotypique, hétérozygotie...) au sein des populations exposées aux rayonnements ionisants. Par une approche de QTL (quantitative trait *loci*) le lien entre un phénotype et une région génomique sera établi, permettant ainsi de mettre en évidence des gènes soumis à la sélection vis-à-vis d'une exposition aux rayonnements ionisants.

Au final, il sera possible d'estimer le potentiel évolutif d'une population de *C. elegans* soumise à des rayonnements ionisants et de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents impliqués dans cette réponse.

**Sujet de la thèse :****Rupture dynamique 3D sur des géométries de failles complexes  
pour étudier les aléas rupture de surface et mouvement sismique en champ proche**

<b>Docteurant :</b>	<b>Rihab SASSI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 11 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / BERSSIN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Sébastien HOK</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yann KLINGER - IPGP</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Sorbonne Université / ED Sciences de la Terre, de l'Environnement et Physique de l'Univers</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / ANR DISRUPT</b>

La rupture de surface après les grands séismes est très variable et complexe. Elle représente une menace pour les infrastructures construites à proximité immédiate des failles actives. L'évaluation de l'aléa sismique pour un site situé à proximité d'une faille doit donc passer par une évaluation du risque de rupture de surface. L'évaluation de l'aléa sismique est principalement basée sur des modèles empiriques qui négligent le rôle de la source sismique. Dans ce travail, nous proposons d'étudier les caractéristiques physiques de la source pour l'évaluation de la rupture de surface. L'introduction des modèles « physics-based » dans les méthodes d'évaluation de l'aléa sismique pourrait permettre à terme de réduire les incertitudes associées à l'estimation du risque sismique à proximité des failles.

La complexité de la rupture de surface après un séisme est due à plusieurs paramètres de la physique de la rupture, telle que la géométrie de la faille, le processus de la rupture, les propriétés du milieu, etc. Dans cette étude, nous proposons de reproduire les caractéristiques de rupture de surface à travers une modélisation numérique de la rupture dynamique. L'outil numérique est un code de calcul de rupture spontanée de faille dans un demi-espace basé sur la méthode des éléments frontières.

Nous utilisons les déformations et les ruptures de surface du séisme de Baluchistan de 2013 (Mw 7.7) obtenues par corrélation optique des images satellitaires pour comparer nos résultats de calcul aux observations. Nous avons étudié, dans une première étape, la propagation de la rupture sur une faille inclinée avec changement de pendage à proximité de la surface, avec ou sans failles secondaires, à travers une modélisation 2D de la rupture. La prochaine étape sera la modélisation 3D du séisme de Baluchistan afin d'étudier l'impact de l'histoire de la rupture et de la variation de la contrainte dynamique sur les modèles de rupture de surface.

**Sujet de la thèse :****Développement d'un capteur à fibre optique  
pour la mesure *in situ* du pH de bétons**

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

Le vieillissement des matériaux cimentaires, principalement leur durabilité mécanique sous les différentes contraintes environnementales rencontrées dans le contexte de Cigéo (Centre industriel de stockage géologique des déchets radioactifs) est un enjeu de sûreté majeur. L'évolution du comportement mécanique des structures cimentaires est principalement la résultante des perturbations physico-chimiques. Depuis 2010, de nombreux travaux ont permis de comprendre ces évolutions et essayer de les extrapoler à plus long terme. Si la majorité des mécanismes réactifs est désormais appréhendée de façon satisfaisante sur le plan physico-chimique, il reste des incertitudes quant à l'évolution chimique de la solution porale contenue dans les bétons. Il existe peu de données expérimentales permettant de valider les modèles d'hydratation ou de vieillissement rencontrés dans la littérature. Les développements proposés dans cette étude n'ont pas vocation à déboucher sur une application industrielle de surveillance.

Le pH est un indicateur fiable et puissant de l'état d'altération des structures cimentaires et sa mesure demeure d'un intérêt majeur dans le cadre du suivi en continu de leur vieillissement. Les sondes optiques constituent une option intéressante pour le suivi de la variation du pH des bétons, sur des durées importantes. Néanmoins, les systèmes décrits dans la littérature ne sont pas applicables pour le suivi en temps réel de variation de hauts pH (> 13).

Dans ce contexte, les objectifs fixés sont de concevoir et de réaliser une optode de pH afin de suivre *in situ* le vieillissement de matériaux cimentaires depuis la prise jusqu'à plusieurs mois/années, avec pour objectifs finaux: i/ la confrontation des résultats expérimentaux avec les modèles d'hydratation et ii/ la présentation d'un démonstrateur opérationnel sur site réel au LRS de Tournemire, voir sur ODE. Pour ceci, un banc optique a été conçu et a permis de mesurer le pH de solutions alcalines. Ces premiers essais ont été réalisés grâce à une sonde moléculaire fluorescente ayant un pKa faible (12,5) pour les applications visées. Une sonde guanidinium ayant un pKa plus élevé (13-13,5) est en cours de synthèse. Des tests seront réalisés en enceinte climatique au laboratoire LUTECE (FAR) dans des échantillons de matériaux cimentaires avec contrôle de l'humidité et de la température pour vérifier le domaine de validité des mesures par rapport à l'état de saturation du matériau. Le polymère sera également testé pour évaluer la valeur du pH dans les bétons des ouvrages existants par son injection dans la porosité du matériau.



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

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

- **Arnaud ALLERA** - Impact du vieillissement sur La plasticité des aciers de cuve : effet des atmosphères de Cottrell sur La nature et La mobilité des dislocations.
- **Delphine COSTA** - Validation des modèles de rétention de la pollution particulaire dans les équipements de réseau de ventilation.
- **Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN** - Étude du comportement au fluage des gaines de Zy-4 pré-oxydées sous sollicitations thermomécaniques représentatives d'un accident de perte de réfrigérant primaire.
- **Gauthier FONTAINE** - Analyse sociologique des incertitudes associées à l'élaboration et l'usage de modèles dans le domaine de l'environnement.
- **Bassam GAMAL** - Développement d'une approche par simulation aux grandes échelles pour la déflagration.
- **Daniel HARDY** - Study of the processes of particle formation through the drying of droplets: application to the characterisation of the particle source term in the event of a fission product evaporator leak.
- **Hantao LIN** - Évaluation de La contribution du mécanisme d'échange isotopique à L'épuration de L'iode radioactif - Application aux tests de pièges à iode par une méthode non-radioactive.
- **Jimmy MARTIN** - Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation en vase.
- **Jean MULLER** - Étude d'un choc thermique au sein d'un fluide.
- **Zeinab RIDA** - Mécanismes de transfert aérodynamique au travers d'ouvertures d'enceintes de chantier : évaluation de la contribution du comportement aérodynamique des aérosols au phénomène de rétrodiffusion.
- **Aya RIMA** - Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil des installations nucléaires françaises.
- **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.
- **Romain VUIART** - Mise au point d'un schéma de calcul pour la quantification de la fluence neutronique vue par la cuve au cours du fonctionnement d'un réacteur de puissance à eau pressurisée.

## Sujet de la thèse :

## Modélisation multi-échelle de la plasticité dans les aciers FeC

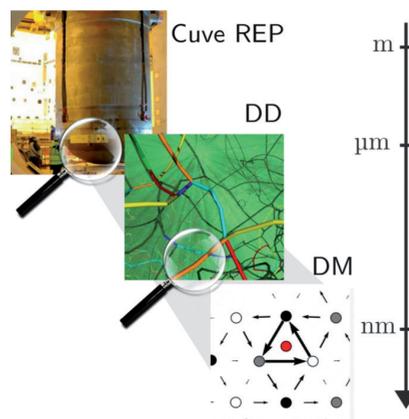
Doctorant :	Arnaud ALLERA
Date du début de la thèse :	08 / 10 / 2018
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Fabienne RIBEIRO
Directeur de thèse :	David RODNEY - Université Lyon 1
Co-directeur de thèse :	Michel PEREZ - Mateis
École doctorale :	Université Lyon 1 / PHAST
Financement de thèse :	IRSN

En service, les cuves de réacteurs à eau pressurisée (REP) INSA de Lyon en acier ferritique (Fe-C) sont soumises à des conditions extrêmes (300°C, 155 bar, irradiation,...) qui peuvent dégrader leurs propriétés. Elles subissent notamment un durcissement et une fragilisation, susceptibles d'avoir un impact sur la sûreté. Par exemple, un refroidissement brutal en réponse à un incident peut causer un choc thermique, susceptible de mener à la rupture si la température descend sous le seuil dit de transition « fragile/ductile ».

Cette modification des propriétés mécaniques de l'acier est due à une évolution de sa microstructure. Ainsi, au cours du temps, les atomes de carbone présents dans les sites interstitiels migrent vers les dislocations et forment des « atmosphères de Cottrell » qui en bloquent le mouvement. Ces mécanismes d'ancrage et de désancrage des dislocations, ainsi que les interactions entre le carbone et les cœurs de dislocation, sont encore mal compris.

L'objectif principal de cette étude est d'établir un lien entre évolution microstructurale et propriétés mécaniques des aciers, pendant le vieillissement sous irradiation. Il s'agit donc de caractériser la mobilité des dislocations dans le fer cubique centré, en tenant compte à la fois des atmosphères de Cottrell, des effets de cœur de dislocation, et de la présence de défauts générés par irradiation. Pour cela, nous combinerons calculs de cœurs de dislocation *ab initio*, de formation d'atmosphères de Cottrell par dynamique moléculaire (DM) et Monte Carlo, et de mobilité de populations de dislocations par dynamique des dislocations (DD).

A l'échelle atomique, les interactions entre atomes, très complexes, doivent être simplifiées de façon à rendre leur calcul possible. Différents types de potentiels interatomiques existent, avec des précisions et des comportements variés : EAM, MEAM, BOP,... A l'heure actuelle, tous échouent à fournir une description des propriétés du système Fe-C en accord avec celles connues expérimentalement ou par calculs *ab initio*. Le choix d'un potentiel d'interaction est donc un point clé pour la réalisation de notre projet. Pour cela, une évaluation systématique des différents potentiels disponibles dans la littérature a été réalisée. Les calculs d'énergie d'interaction carbone-dislocation et de reconstruction de cœur en présence de carbone ont permis de valider un premier choix de potentiel. Nous poursuivrons par des simulations atomiques à plus grande échelle de la mobilité d'une dislocation en présence d'atomes de carbone.



**Sujet de la thèse :****Validation des modèles de rétention de la pollution particulaire dans les équipements de réseau de ventilation**

---

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

---

La sûreté nucléaire repose en partie sur la maîtrise des transferts de contamination dans les installations et sur la maîtrise des rejets à l'environnement. Afin d'améliorer l'estimation du terme source à l'environnement, il est essentiel de pouvoir quantifier les dépôts de contamination particulaire au sein des gaines et des équipements des réseaux de ventilation. Pour cela, un banc d'essai à échelle 1, appelé DIESE (Dépôt dans les Installations, les Équipements et les Sondes d'Echantillonnage), a été mis en place à l'IRSN.

La première phase de la thèse consiste à définir les essais en choisissant notamment les singularités à étudier et la métrologie.

Peu d'études traitent, en effet, du dépôt d'aérosols dans les singularités comme les coudes, les réductions et les registres. De plus, les débits d'écoulement étudiés sont importants et impliquent que les concentrations injectées en aérosol soient élevées ou que la mesure de dépôt soit très sensible : l'instrumentation choisie conditionnera la taille et la nature des particules qui seront injectées dans DIESE, donc le système d'injection.

Les différentes techniques de mesure de dépôt sont étudiées et se répartissent entre les mesures de concentration (fluorimétrie, techniques optiques) et les mesures de masse directes (pesée) ou indirectes (capteur résistif par exemple). Un des outils les plus facilement mis en œuvre a déjà été utilisé à l'IRSN et repose sur le phénomène d'extinction de la lumière sur une cellule photovoltaïque. La tension produite par la cellule diminue en fonction de la masse déposée sur sa surface. Des essais préliminaires sur la technique choisie sont prévus dans des conditions maîtrisées pour une phase de mise au point avant son implantation dans DIESE.

La seconde phase de la thèse comprendra des expériences sur le dépôt dans DIESE et des calculs CFD. Les résultats obtenus seront comparés pour valider les modèles de dépôt d'aérosols à l'échelle industrielle, ces modèles étant généralement validés à plus petite échelle.

Des calculs CFD supplémentaires seront réalisés pour la troisième phase sur des singularités similaires à celles étudiées dans la seconde phase, mais dont on fera varier certains paramètres géométriques (angle d'un coude par exemple). Ceci permettra d'obtenir des abaques de dépôt dans un type de singularité. Ils pourront être, à terme, utilisés dans SYLVIA, logiciel OD permettant d'étudier le comportement des réseaux de ventilation en situation normale, dégradée ou accidentelle.

**Sujet de la thèse :**

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

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

Cette thèse s'intègre dans l'étude des Accidents de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) des réacteurs à eau pressurisée. Lors d'un APRP, le chargement thermomécanique appliqué aux gaines de Zy-4 entraîne leur ballonnement par fluage. Ce ballonnement conditionne le renoyage et donc la refroidissabilité du cœur.

Lors du fonctionnement normal précédent l'accident, les gaines s'oxydent et s'hydrurent. Des essais exploratoires sur des gaines pré-oxydées réalisés par (CAMPELLO, 2016) ont mis en évidence une diminution forte des vitesses de ballonnement des gaines pré-oxydées lors de l'APRP par rapport à des gaines vierges tant que la couche de zircone en surface n'est pas fissurée. La vitesse de ballonnement externe des gaines résulte de physiques complexes et couplées (viscoplasticité, diffusion, Oxydation, Fissuration...).

Ce travail s'inscrit dans la suite des résultats précédemment obtenus et s'appuie sur une démarche en deux temps :

1. Des essais semi-intégraux de référence sur la plateforme expérimentale Ellie à l'INSA de Lyon. L'étude se limitera à des chargements de l'ordre de 800°C et des pressions internes de 30 à 70 bars. L'influence de l'état initial des gaines (épaisseur d'oxyde initiale) et de l'environnement (inerte, oxydant) dans les conditions thermomécaniques définies précédemment sera analysée.

2. La mise en place d'une modélisation des gaines par un matériau sandwich (Zircone / Zy-4 / Zircone) en éléments finis intégrant un couplage multi physique (diffusion de O, oxydation, fluage, fissuration). Les outils numériques pour simuler les discontinuités (fissuration, oxydation) seront basés sur des approches en champs de phases.

CAMPELLO, D. (2016, 12 16). Développement d'essais de ballonnement instrumentés pour la caractérisation et la simulation du fluage secondaire de gaines en Zy-4 dans des conditions thermomécaniques représentatives d'un APRP. PhD thesis Insa Lyon.

**Sujet de la thèse :****Analyse sociologique des incertitudes associées à l'élaboration  
et l'usage de modèles dans le domaine de l'environnement**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Gauthier FONTAINE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2018</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>Pierre WAGNER</b>
<b>Co-directeur de thèse :</b>	<b>Franck VARENNE – Paris 1</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Sorbonne - ED philosophie</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Comment évaluer la contamination présente et future des terres japonaises suite à l'accident de Fukushima ? Cette question est au cœur des activités de l'IRSN, et la – ou les – réponses à celle-ci, apportées notamment par les experts scientifiques, conditionnent la résolution de grandes problématiques : l'évacuation des populations et le retour de celles-ci, la possibilité de rendre les sols à nouveau cultivables et de reprendre la pêche commerciale, l'estimation de la dose cumulée reçue par les habitants pour le suivi médical ou la protection de la faune et la flore pour préserver les écosystèmes. De nombreuses équipes dans le monde, et notamment à l'IRSN, travaillent donc à la résolution de cette question qui agglomère de nombreux enjeux, en créant, améliorant ou utilisant des modèles de transport et de transferts de radionucléides dans l'environnement, pour quantifier, mesurer et prévoir le comportement de ces éléments dispersés suite à l'accident.

C'est dans ce contexte particulier de production intellectuelle sous pression sociale, économique et politique que s'inscrit cette thèse de philosophie des sciences : il s'agit d'étudier l'élaboration et l'usage de modèles dans le domaine de la contamination post-accidentelle, par une approche principalement épistémologique, mais aussi sociologique, en interrogeant à la fois le statut et le rôle des modèles dans la science, mais aussi l'influence de nombreux facteurs – techniques, sociaux ou politiques – dans la création et l'utilisation de ceux-ci.

L'objectif est de réaliser une généalogie conceptuelle et sociale des modèles de contamination post-accidentelle à l'IRSN, qui s'attachera particulièrement à explorer la place de la modélisation et de la simulation dans la création de connaissances à l'institut. Il s'agit plus particulièrement de déterminer les fonctions épistémiques des modèles utilisés, leurs évolutions conceptuelles et formelles ou les résistances au changement qu'ils suscitent. L'analyse concernera également les « arènes » dans lesquelles ont été mis à l'épreuve ces modèles, que ce soient dans les grands projets internationaux (AIEA), dans leur phase de validation ou même lors des accidents réels (Windscale-Sellafield, Tchernobyl, Fukushima).

Nous nous intéresserons pour cela aux modèles de transfert du <sup>137</sup>Cs et à leurs paramètres-clés, en nous appuyant sur les archives de l'IRSN, sur les actes des congrès et documents produits par les projets internationaux, sur les témoignages des chercheurs et experts qui ont contribué au domaine, ainsi que sur l'observation et la participation aux activités scientifiques en cours à l'institut, sur le terrain ou encore dans d'autres instances comme les groupes de travail à l'AIEA.

**Sujet de la thèse :****Développement d'une approche par simulation aux grandes échelles  
pour la déflagration**

<b>Doctorant :</b>	<b>Bassam GAMAL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>07 / 11 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Laura GASTALDO</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Denis VEYNANTE - EM2C</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Centralesupelec Paris / SMEMaG</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

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

Le logiciel CALIF3S-P<sup>2</sup>REMICS a été développé par l'IRSN dans ce but. Il permet de traiter les écoulements turbulents réactifs compressibles ou faiblement compressibles, tels que ceux rencontrés lors d'une explosion. Le modèle de combustion, basé sur une approche de type level-set, suppose que le processus qui transforme les gaz frais en gaz brûlés advient dans une zone réactive mince se propageant à travers l'écoulement. Il est fermé par une corrélation de vitesse de flamme turbulente, le plus souvent obtenue expérimentalement. La validation du logiciel a mis en évidence d'une part la difficulté de choisir une corrélation de vitesse de flamme "adaptée" à la configuration étudiée et d'autre part la grande dispersion de résultats obtenus selon la corrélation choisie. Cette difficulté est amplifiée par le fait que ces corrélations dépendent fortement des caractéristiques turbulentes de l'écoulement et qu'il n'existe à ce jour pas ou très peu de résultats expérimentaux permettant de valider les modèles de turbulence implémentés dans CALIF3S-P<sup>2</sup>REMICS.

La turbulence est modélisée à ce jour selon des modèles statistiques (RANS) en un point. L'objectif de cette thèse est de développer et d'implémenter dans CALIF3S-P<sup>2</sup>REMICS un modèle aux grandes échelles adapté à nos configurations d'intérêt, afin d'obtenir une modélisation plus précise de la turbulence et de mieux appréhender les phénomènes en jeu. Ceci nous permettra de construire, pour les applications industrielles, une approche plus prédictive en améliorant les modèles RANS existants, voire en développant une nouvelle corrélation de vitesse de flamme.

La première étape de la thèse a été de développer un modèle aux grandes échelles pour les écoulements non réactifs compressibles. Le système d'équations régissant l'écoulement est résolu à l'aide d'un schéma explicite en temps de type volumes finis à mailles décalées. La stabilité du schéma suivant une condition de type CFL a été prouvée ainsi que la consistance du schéma par rapport aux équations du modèle continu. Le modèle a été validé sur des cas analytiques issus de la littérature.

## Sujet de la thèse :

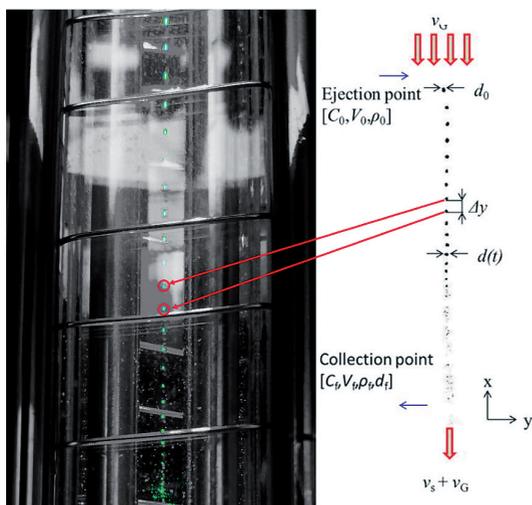
**Study of the processes of particle formation through the drying of droplets:  
application to the characterisation of the particle source term  
in the event of a fission product evaporator leak**

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

In the nuclear industry, large amounts of radioactive materials are handled in the liquid phase. In the event of an accident aerosol droplets could be produced, these droplets would dry to form solid phase aerosol particles. Parameters governing droplet-drying impact final dry particle morphology which in turn determines the aerodynamic and transport properties of the dry particles. It is essential for the IRSN to understand the transport properties of released particles.

My research aims to determine the transport properties of aerosol particles formed by droplet-drying by understanding the particle formation process, including shell formation and deformation. I aim to predict particle morphology based on initial solution composition and knowledge of evaporation kinetics and to form a general model for prediction of shell deformation leading to transport properties. Findings are to be integrated into IRSN's wider work regarding aerosols and relate to aerosol sources of concern.

A monodisperse chain of droplets is established in an isolated environment of controlled temperature and relative humidity. Stroboscopic illumination is used to establish a stationary image of droplets separated by an equal time period throughout the drying process. This allows calculation of droplet aerodynamic diameter (see figure 1). Droplet size is measured using a calibrated optical image and can additionally be measured using laser light scattering and Mie theory. Final particles can be collected, and their morphologies imaged using SEM.



System optimisations have been made to the experimental set up including quadrupole stabilisation of the droplet chain, control of the gas flow and improved measurement systems. Preliminary results have shown the droplet chain instrument capable of measuring droplet properties far earlier in the droplet lifetime – within first 100ms – than other single droplet techniques (such as electrodynamic balance or optical trapping, these techniques will also be used for to extend and compare results). Data from droplets of simple solvents has been compared with model predictions. Measurements on rapidly evaporating droplets have been obtained with high time resolution, which is ideal for modelling potential droplets formed from fission product evaporators.

1. Baldelli et al, (2015)., Molecular Pharmaceutics, 12(8), 2562–2573. <http://doi.org/10.1021/mp500758s>

**Sujet de la thèse :****Évaluation de La contribution du mécanisme d'échange isotopique  
à L'épuration de L'iode radioactif - Application aux tests de pièges à iode  
par une méthode non-radioactive**

<b>Doctorant :</b>	Hantao LIN
<b>Date du début de la thèse :</b>	02 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSN-RES / SCA / LECEV
<b>Tuteur de thèse :</b>	Céline MONSANGANT-LOUVET
<b>Directeur de thèse :</b>	Denis DOIZI - CEA
<b>École doctorale :</b>	Sorbonne Université / ED de Chimie physique et de chimie analytique de Paris centre
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

La nécessité de limiter le rejet des substances radioactives dans l'environnement a toujours constitué un enjeu fort dans le domaine de la radioprotection et de la sûreté des installations nucléaires, que ce soit en exploitation normale de ces installations, en situation d'incident ou en condition d'accident grave. Dans le cas de l'exploitation normale, la diminution attendue des autorisations de rejets implique des efforts réguliers de recherche et développement sur l'amélioration des procédés existants ou la mise au point de procédés innovants, dont l'efficacité et la sûreté doivent être démontrées. A l'autre extrémité des conditions d'exploitation, la catastrophe de Fukushima a remis au premier plan la nécessité d'évaluer et de proposer des moyens de réduction des rejets à l'environnement dans différentes situations pouvant aller jusqu'à la perte du confinement d'un réacteur. Un des moyens de réduction des rejets en iode radioactif est l'utilisation de charbons actifs. Ma thèse a pour objectif de caractériser et de quantifier un des mécanismes de rétention de l'iode dans les charbons actifs, l'échange isotopique.

Elle se concentre dans une première phase sur une étude bibliographique sur les méthodes de tests des pièges à iode mettant en œuvre l'iodure de méthyle  $\text{CH}_3\text{I}$ , forme chimique universellement considérée comme la plus "pénétrante" de l'iode, sur les moyens d'analyse tels que la chromatographie en phase gazeuse avec détecteur par capture d'électrons à décharge pulsée (GC-PDECD) et la spectrométrie  $\gamma$ , mesure universelle et précise pour la quantification des radioéléments émetteurs  $\gamma$ , mais aussi sur les caractéristiques des charbons actifs et leur caractérisation par différentes méthodes.

Par la suite, après comparaison des méthodes radioactives ( $\text{CH}_3\text{I}^{131}$ ) et non radioactives ( $\text{CH}_3\text{I}^{127}$ ), l'efficacité de l'échange isotopique sera explorée sur une grande variété de charbons actifs imprégnés à l'iodure de potassium. Un modèle empirique d'échange isotopique sera élaboré en fonction de l'ensemble des paramètres expérimentaux (caractéristiques intrinsèques du charbon imprégné et conditions opératoires) en adaptant si nécessaire les modèles existants au cas de l'adsorption de composés iodés radioactifs.

Le verrou scientifique se situe dans la mesure de l'iode radioactif et non radioactif en très faible concentration ainsi que dans la différenciation de l'échange isotopique des autres mécanismes de piégeage de l'iode dans les charbons actifs.

**Sujet de la thèse :****Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation en vase**

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

---

En cas de perte prolongée du refroidissement d'une piscine d'entreposage du combustible, la chaleur dégagée par le combustible est transmise à l'eau qui peut se vaporiser progressivement. Parmi les modes possibles de vaporisation figure la nucléation de bulles à partir d'eau surchauffée. Lors d'un accident, l'eau initialement chauffée sans bouillir au droit des combustibles, stockés en partie basse, s'élève par convection naturelle au sein du bassin. La grande profondeur des piscines, de l'ordre de 10 mètres, conduit à une variation verticale de température de saturation de près de 20°C, alors propice à une surchauffe de l'eau en mouvement. Le phénomène d'autovaporisation en vase, sujet de ce travail de thèse, désigne le retour à la saturation par la génération de bulles de cette eau surchauffée gravitairement.

Or ce mode de vaporisation n'est pas sans conséquence sur la sûreté de l'installation. En effet, des bulles présentes au sein de la piscine peuvent capter et transporter les espèces radioactives gazeuses dissoutes dans l'eau. Leur éclatement au niveau de la surface libre est aussi une source potentielle d'aérosols contaminés. De plus, leur présence au droit de la section d'aspiration du système PTR peut compromettre la reprise du refroidissement en cours d'accident.

Par ailleurs, le phénomène est à l'heure actuelle insuffisamment décrit dans la littérature. Dans les conditions d'un accident au sein d'une piscine, il existe une forte incertitude quant aux mécanismes par lesquels s'opère l'autovaporisation : *des bulles nucléent-elles spontanément, sur des germes gazeux libres préexistants ou sur des particules solides en suspension ? Ou bien prennent-elles forme sur les parois immergées du bassin, en contact avec le liquide surchauffé ?*

Cette première année de thèse est consacrée à l'étude de l'autovaporisation au moyen d'un dispositif expérimental reproduisant à petite échelle la configuration d'une piscine et réalisé à l'Université catholique de Louvain. En jouant sur la pression et la puissance de chauffage, il s'agit de comprendre les conditions propices à la génération de bulles et d'en estimer l'intensité. L'expérience dispose de mesures de pression et de température ainsi que d'une caméra rapide, couplée à un dispositif d'ombroscopie, permettant une étude fine des bulles formées. Les premiers essais réalisés ont permis de mettre en évidence le rôle crucial joué par la concentration des gaz dissous dans le liquide dans le processus d'autovaporisation. Au cours des années suivantes, les essais de caractérisation du phénomène seront poursuivis. Des travaux de modélisation, notamment au sein du logiciel de thermohydraulique diphasique Neptune\_CFD seront menés sur la base des résultats expérimentaux obtenus.

## Sujet de la thèse :

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

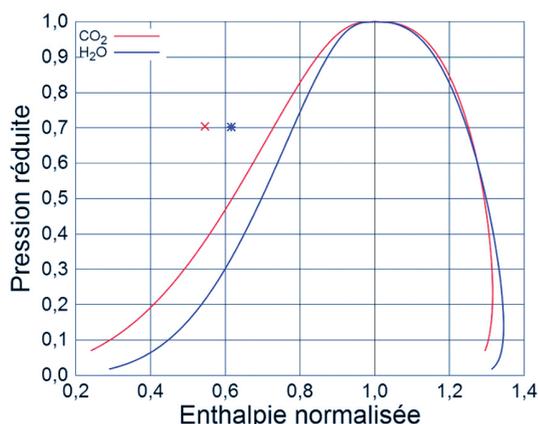
Doctorant :	Jean MULLER
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2018
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LIMAR
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Marc CLAUSSE - CETHIL
École doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Financement de thèse :	IRSN / EDF

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

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

La boucle E.D.I.T.E (Étude d'un Dépôt Important et Transitoire d'Énergie), développée en collaboration avec le CETHIL lors d'une précédente thèse (Abbate-2018), permet de reproduire cette phénoménologie dans des conditions de laboratoire. L'eau pressurisée est simulée par du dioxyde de carbone à 50 bars et - 6°C. Ceci permet, comme illustré sur la figure, la conservation de la pression réduite (rapport de la pression et de la pression critique : axe vertical) et du titre thermodynamique (écart à la saturation : axe horizontal) entre l'eau et le dioxyde de carbone et de travailler en similitude.

Le transfert de chaleur vers le dioxyde de carbone est généré par l'échauffement par effet Joule d'un filament de tungstène au sein duquel une batterie de condensateur (23 mF) se décharge en quelques millisecondes. Le dispositif a permis d'obtenir de nombreux résultats mais les niveaux d'énergie restent limités par la rupture prématurée du filament.



La première partie de la thèse porte sur l'étude du dispositif expérimental pour lequel plusieurs évolutions sont en cours d'étude (améliorations de l'élément chauffant et de la mesure de la chaleur transmise au fluide, visualisation des phénomènes...). En parallèle, des travaux théoriques de modélisation du phénomène sont entrepris. À terme, on étudiera la simulation du phénomène d'interaction à l'aide du logiciel CIGALON, développé à l'IRSN pour l'interprétation des essais réalisés sur le réacteur CABRI dans le cadre du programme CIP.

**Sujet de la thèse :**

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

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

---

Les chantiers de maintenance et d'assainissement dans les centrales nucléaires nécessitent la mise en place d'enceintes ventilées autour des zones contaminées, afin de limiter la propagation de la contamination à l'environnement extérieur. Ces enceintes sont mises en dépression par rapport au local dans lequel elles sont implantées, selon le principe du confinement dynamique : l'air entre dans l'enceinte au travers d'ouvertures inhérentes à la conception de l'enceinte ou accidentelles. Toutefois, en raison des activités d'exploitation, il est possible que l'écoulement au droit d'une ouverture subisse des inversions locales et stationnaires conduisant à transporter la contamination à l'extérieur de l'enceinte : il s'agit du phénomène de rétrodiffusion. Dans le cadre de sa thèse, S. Kaissoun a étudié ce phénomène à partir d'un gaz traceur, l'hélium, sur un dispositif expérimental dédié, et a pu mettre en évidence, pour différentes perturbations aérauliques, un effet de seuil dans le déclenchement de ce phénomène de rétrodiffusion.

L'objectif de ma thèse consiste, dans la continuité de celle de S. Kaissoun, à caractériser et à quantifier les phénomènes de rétrodiffusion, gazeux puis particulaires, au niveau d'une ouverture créée sur des parois rigides ou souples. Les résultats doivent permettre de valider les codes CFD mis en œuvre à l'IRSN afin de réaliser, in fine, des études paramétriques sur des sas à échelle réelle.

Pour cela, la maquette existante sera adaptée à la quantification des transferts gazeux et particulaires locaux autour de l'ouverture et globaux à l'extérieur de l'enceinte, grâce à la mise en œuvre d'une enveloppe collectrice, laquelle est actuellement en cours de dimensionnement.

Différentes techniques de mesure seront implantées sur la maquette (spectrométrie hélium et PIV), dont une technique de mesure appelée BOS (*Background Oriented Schlieren*), en cours de qualification, en vue d'accéder aux champs de concentrations en hélium autour de l'ouverture. Des techniques de mesures spécifiques des traceurs particulaires seront implantées ultérieurement.

Mes travaux de thèse comportent également la réalisation de simulations CFD. Notons que les travaux de simulation déjà entrepris par S. Kaissoun avaient démontré l'efficacité des méthodes LES ou à minima hybrides pour visualiser le phénomène de rétrodiffusion gazeux, sans toutefois aller jusqu'à la comparaison quantitative des transferts. L'un des objectifs de la thèse réside ainsi dans la comparaison quantitative numérique et expérimentale des courbes de seuil de rétrodiffusion gazeux et particulaires.

L'objectif final de cette thèse sera de valider les résultats obtenus en configuration analytique sur un sas réel.

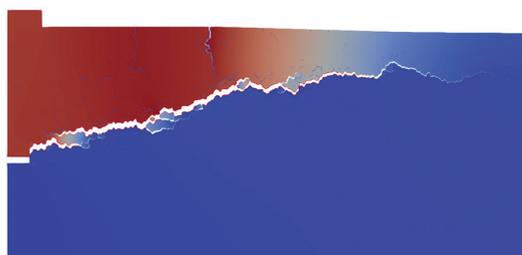
**Sujet de la thèse :****Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil  
des installations nucléaires françaises**

<b>Doctorant :</b>	Aya RIMA
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2018
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP / SES / BEGC
<b>Tuteur de thèse :</b>	Marie-Hélène BONHOMME
<b>Directeur de thèse :</b>	Frédéric RAGUENEAU – ENS Paris-Saclay
<b>École doctorale :</b>	Université Paris-Saclay / SMEMaG
<b>Financement de thèse :</b>	CSTB

Les systèmes d'ancrage chevillé assurent la liaison entre les différents composants et permettent la transmission des charges entre les différents éléments d'une structure. La notion de qualification au séisme de ces chevilles est assez récente. Des essais réalisés ces dernières années au CSTB sur des ancrages non qualifiés au séisme montrent qu'il est difficile de prévoir la résistance des ancrages sous sollicitations sismiques. D'autre part, on constate que l'effort maximal de cisaillement sous sollicitation sismique que peut supporter les chevilles est très inférieur à l'effort de cisaillement admissible sous sollicitations statiques. En plus, la plupart des chevilles présentes sur le parc nucléaire français, à l'exception des chevilles mises en place ces dernières années, ne sont pas qualifiées pour les charges sismiques et le sont uniquement pour les charges statiques et quasi-statiques. De ce fait, l'évaluation du comportement des ancrages existants constitue un enjeu majeur pour la sûreté notamment en cas de séisme.

Le verrou scientifique associé est la prise en compte de l'endommagement du béton dans l'analyse du comportement des ancrages et la modélisation non linéaire à y associer.

L'objectif de ce sujet de thèse est l'évaluation du comportement des ancrages présents dans les ouvrages des installations nucléaires en cas de séisme. La démarche scientifique dans le cadre de cette thèse consiste à utiliser la base expérimentale de qualification des chevilles anciennes du CSTB et à rassembler les données de plusieurs centaines d'essais pour établir un modèle numérique 3D du comportement de ces ancrages en cas de chargement sismique (extension du modèle particulaire-lattice DEAP). La validation du principe de modélisation en 2D sera faite par des simulations préliminaires sur une cheville percée dans le béton. Ensuite, un développement de la version 3D du code particulaire-lattice DEAP aura lieu en prenant en considération les mécanismes de contact et de frottement.



*Rupture par cône de béton (Pull-out test)*

**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>	Vivian SALINO
<b>Date du début de la thèse :</b>	25 / 09 / 2017
<b>Laboratoire :</b>	PSN-EXP / SNC / LN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Eric DUMONTEIL
<b>Directeur de thèse :</b>	Alain HEBERT – École Polytechnique de Montréal
<b>École doctorale :</b>	École Polytechnique de Montréal
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

---

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 :**

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

<b>Docteurant :</b>	<b>Romain VUIART</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>08 / 10 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SNC / LN</b>
<b>Tuteurs de thèse :</b>	<b>Mariya BROVCHENKO et Julien TAFOREAU</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Éric DUMONTEIL – PSN-EXP / SES / BEGC</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université de Paris-Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

L'étude du vieillissement de la cuve est une composante importante de l'analyse de sûreté associée à la prolongation de la durée de vie des réacteurs du parc français. En effet, la cuve ne peut être remplacée, et constitue à ce titre un des composants technologiques limitant la durée de vie du réacteur. L'endommagement de la cuve est lié à l'irradiation sous flux neutronique rapide ( $E > 1$  MeV) qui peut causer des dommages dans la structure des matériaux qui la compose. De fait, la fluence neutronique vue par la cuve, c'est-à-dire le flux de neutrons intégré au cours du temps, est un des paramètres clé permettant d'estimer les dégâts subis par la cuve. L'objectif de cette thèse consiste par conséquent à développer une méthodologie permettant de réaliser des calculs individualisés (c'est-à-dire lié à un historique d'irradiation particulier) de la fluence rapide vue par la cuve des réacteurs à eau pressurisée. Les prédictions du modèle pourront ensuite être étendues à d'autres observables d'intérêt comme le calcul des déplacements par atome (dpa), la production de gaz ou encore l'irradiation neutronique incidente sur d'autres composants du cœur (internes, enceinte en béton...).

Afin de mettre en place une telle méthodologie, la première phase du travail consiste à étudier et à comprendre l'impact des différents paramètres influant sur le fonctionnement du réacteur (puissance du réacteur, insertion des grappes absorbantes...) afin d'évaluer leurs poids respectifs lors d'un calcul de fluence cuve (et éventuellement leurs interactions). Une première étude a démontré que l'historique de puissance d'un réacteur (et les insertions associées des grappes absorbantes) doit être pris en compte dans les calculs de fluence cuve si le réacteur a fonctionné en moyenne à une puissance significativement inférieure à sa puissance nominale.

La deuxième phase du travail consistera en la construction d'un modèle mathématique visant à prédire le comportement des observables d'intérêt (fluence, dpa...) en fonction des conditions d'exploitation du réacteur. Cette méthode consiste donc à définir un modèle simplifié de réacteur à eau pressurisée, de sorte à pouvoir évaluer très rapidement les grandeurs d'intérêt (et leurs incertitudes) pour un grand nombre de scénarios possibles concernant l'historique du réacteur. Après avoir testé la méthodologie sur des cas simples, le développement d'une maquette numérique du schéma de calcul sera réalisé. En fonction des données disponibles, un cas concret sera étudié permettant de valider le modèle ou de comparer les résultats obtenus à ceux d'autres schémas de calcul.

## DOCTORANTS NON PRÉSENTS

- **Abdelattif AMMAR** - Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif du béton sur le développement des réactions de gonflement interne.
- **Amine BEN DAOUED** - Démarche probabiliste pour la modélisation de l'aléa inondation avec prise en compte des incertitudes.
- **Nicolas DECHY** - Des leçons à apprendre des accidents à l'utilisation d'une nouvelle connaissance et culture des accidents.
- **Pierre LEFEBVRE** - Évolution à long terme de la spéciation et de la mobilité de l'uranium dans les sédiments lacustres.

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Abdelattif AMMAR</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 10 / 2017</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP / SES / LMAPS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Georges NAHAS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Michel TORRENTI - IFSTTAR</b>
<b>Co-directeur de thèse :</b>	<b>Arezki TAGNIT-HAMOU - Université de Sherbrooke</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Université Paris Est - Université de Sherbrooke (Canada)</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

Les matrices cimentaires et les bétons sont utilisés comme matériaux de structure et de conditionnement à divers stades de l'industrie nucléaire. Dans le domaine de la gestion de déchets radioactifs, la radioactivité des déchets se traduit par l'émission d'une forte puissance thermique. Au contact ou à proximité du béton, il en résulte 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 peut aussi concerner les bétons des piscines de refroidissement des combustibles usagés localisés au sein des centrales nucléaires, les puits de cuve dans les réacteurs et les zones à proximité du générateur de vapeur. Cet échauffement pourrait avoir des conséquences néfastes sur la structure. En effet, une montée excessive de la température du béton durci est susceptible de générer des dégradations du matériau résultant des processus chimiques, thermiques et hydriques. Cet échauffement tardif peut également être accompagné de l'apparition de pathologies de gonflement interne telle que la Réaction Sulfatique Interne (RSI). 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. Un programme expérimental est mis en œuvre afin d'étudier ce phénomène. Trois types de ciment sont étudiés dans le cadre de cette thèse ; les deux premières ont été utilisées pour la fabrication de quelques enceintes de confinement et le troisième ciment sera utilisé pour la fabrication des conteneurs de stockage pour CIGEO. Le programme expérimental comporte deux parties :

La première partie a été réalisée, durant la première année à l'IFSTTAR<sup>(1)</sup>, sur des pâtes de ciment fabriquée avec les trois types de ciment CEMI, CEMII/A-LL et CEMV. Différentes techniques de caractérisation<sup>(2)</sup> ont été employées afin d'étudier la microstructure et l'évolution des compositions minéralogiques sur des éprouvettes traitées à 2 températures de maintien 20°C à 80°C avec 5 durées de traitement<sup>(3)</sup> sous une humidité relative de 54% après 91 jours de stockage sous eau. Les résultats préliminaires montrent une variation importante de la microstructure à 80°C : un réseau de fissuration et de porosité plus massif avec une dégradation des phases aluminates dès les premiers jours du traitement.

La deuxième partie est en cours de réalisation sur des éprouvettes en béton à l'Université de Sherbrooke au Canada. L'objectif est d'étudier l'impact de l'échauffement tardif sur l'évolution des propriétés mécaniques, de transfert et le développement potentiel de la RSI à différentes échelles de la structure.

L'objectif final sera d'évaluer le risque de développement de la RSI dans les ouvrages en béton par effet d'échauffement tardif et l'influence de cette température sur les fonctions de sûreté attribuées à ces ouvrages en termes de stabilité ou de confinement.

1) IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports et de l'Aménagement des Réseaux.

2) Parmi les techniques utilisées : La diffractométrie des Rayons X, Microscopie Électronique à Balayage, Analyses Thermogravimétriques, Porosité par intrusion de Mercure et Surface spécifique par adsorption d'azote (N<sub>2</sub>)

3) 1 jour, 3 jours, 7 jours, 14 jours et 28 jours.

**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 HAMD</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Nassima MOUHOUS-VOYNEAU / UTC</b>
<b>Co-directeur de thèse :</b>	<b>Philippe SERGENT / Cerema</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>UTC / AVENUES</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>UTC-IRSN</b>

---

De nombreuses zones urbaines côtières et de nombreuses installations côtières doivent être protégées contre les inondations pluviales et marines, car leur localisation à proximité de la mer est un besoin. Dans le cadre du développement d'une approche probabiliste de l'aléa inondation (*Probabilistic Flood Hazard Assessment* ou « PFHA »), plusieurs phénomènes d'inondation doivent être modélisés pour estimer la contribution de chacun de ces phénomènes.

La modélisation de la dépendance et de la concomitance de plusieurs sources d'inondation est une question clé dans le contexte d'un PFHA. Les zones côtières étant densément peuplées en France, les inondations marines représentent un risque naturel menaçant les populations et les installations côtières dans plusieurs zones le long du littoral. En effet, les inondations marines constituent la plus importante source d'inondations des zones côtières basses. Ces inondations sont principalement générées par les tempêtes qui font monter le niveau marin au-dessus de la marée. De plus, lorsque ces submersions marines sont combinées avec de fortes précipitations, les inondations côtières peuvent être plus conséquentes. Bien qu'il existe plusieurs approches pour analyser et caractériser les inondations des zones côtières, qu'elles soient dues à un niveau marin extrême ou à des pluies intenses, seules quelques études combinent ces deux phénomènes dans un cadre de PFHA.

Les travaux de cette thèse ont permis de développer une nouvelle méthode pour prendre en compte l'action combinée de plusieurs phénomènes d'inondation. Cette méthode est appliquée sur la ville du Havre, une ville française située sur la côte de la Manche, avec la pluie et le niveau marin comme phénomènes d'inondation. Les premiers résultats de cette thèse ont montré que les phénomènes non-concomitants sont les plus nombreux et dominant dans l'analyse globale. Toutefois, la contribution des phénomènes concomitants est visible et ne peut pas être négligée. En revanche, on met en évidence que la dépendance de la pluie et du niveau marin peut être négligée au site du Havre. Par ailleurs, la pluie domine aujourd'hui sur le site du Havre. Les contributions des submersions marines et des pluies pourraient désormais être inversées dans 50 ans, sous l'impact du changement climatique.

**Sujet de la thèse :**

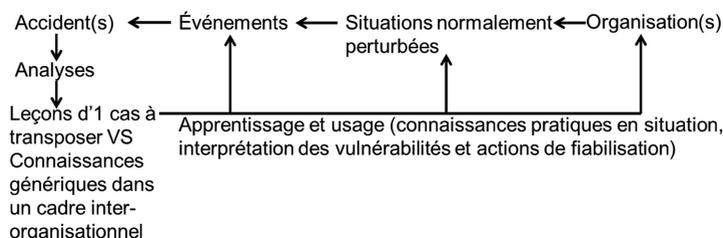
**Des leçons à apprendre des accidents à l'utilisation d'une nouvelle connaissance et culture des accidents**

**Doctorant :** Nicolas DECHY  
**Date du début de la thèse :** 20 / 03 / 2018  
**Laboratoire :** PSN-SRDS / SHOT / LSHS  
**Tuteur de thèse :** Alexandre LARGIER  
**Directeur de thèse :** Benoît JOURNE – Université de Nantes  
**École doctorale :** EDGE / ED Sciences Economiques et sciences De Gestion rattaché à l'IMT-Atlantique  
**Financement de thèse :** IRSN

Le développement des industries à haut-risques a été marqué par des catastrophes retentissantes. Des enquêtes ont été menées pour comprendre les causes profondes de ces catastrophes afin de tirer des enseignements et de définir des actions correctives. Pourtant des accidents similaires se reproduisent (navettes spatiales, série noire à BP, nucléaire japonais), mettant en exergue les manques du retour d'expérience.

L'étude empirique des accidents industriels – d'un point de vue organisationnel, sociotechnique et systémique - permet d'observer une récurrence des causes profondes quels que soient les secteurs industriels, les époques et les cultures. Ce constat ouvre ainsi sur l'opportunité d'une capitalisation: « la connaissance des accidents », qui constitue la proposition initiale de la thèse (Dechy *et al*, 2010).

Cependant, l'enjeu opérationnel pour la prévention des accidents majeurs est que cette connaissance des accidents du passé puisse être utilisée dans le fonctionnement normal (en conception et en exploitation) pour le présent (lors de diagnostics) et l'anticipation (lors de pronostics) notamment dans l'expertise.



L'objectif de cette thèse est de répondre ainsi aux deux questions suivantes:

1. Pourquoi peut-on mieux capitaliser les leçons des accidents et former une « connaissance des accidents » ?
2. Comment peut-on mieux transférer et utiliser la connaissance des accidents en prévention ?

La première question appelle un travail de justification empirique qui doit être consolidé théoriquement. La seconde question ouvre vers les mécanismes et dispositifs de gestion pour faciliter le transfert des connaissances des accidents et leur utilisation.

La revue de littérature scientifique s'inscrit en sciences de gestion, notamment sur l'apprentissage organisationnel et la gestion des connaissances. Elle doit être approfondie à partir de l'étude de cas « a-théorique » engagée sur les mécanismes de mobilisation de cette connaissance dans la pratique d'expertise à l'IRSN. L'étude de cas concerne l'instruction du management de la sûreté et de la radioprotection en arrêt de tranche présentée devant le Groupe Permanent Réacteur en juin 2013. Les connaissances des accidents ont été mobilisées dans le référentiel des experts pour cadrer l'expertise, interpréter les données, fonder les conclusions, ainsi que pour convaincre les membres du GPR.

**Sujet de la thèse :****Évolution à long terme de la spéciation et de la mobilité de l'uranium  
dans les sédiments lacustres**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Pierre LEFEBVRE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 09 / 2018</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSE-ENV / SEDRE / LELI</b>
<b>Tuteurs de thèse :</b>	<b>Arnaud MANGERET – Alkiviadis GOURGIOTIS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Guillaume MORIN - IMPMC</b>
<b>École doctorale :</b>	<b>Sorbonne Université / GRNE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Sorbonne Université</b>

---

L'uranium est un radionucléide toxique dont il est essentiel de limiter la dispersion dans l'environnement. À ce titre, la compréhension des mécanismes d'immobilisation de l'uranium dans les milieux réducteurs est une étape indispensable pour assurer la remédiation des sites contaminés. En outre, la réactivité des formes chimiques de l'uranium récemment identifiées dans les sédiments actuels conduit à mieux s'interroger sur les conditions de l'utilisation de cet élément comme marqueur paléo-redox.

L'objectif de ce travail de thèse est de renforcer notre connaissance sur l'évolution de la spéciation de l'uranium dans les milieux naturels anoxiques à partir de l'étude d'enregistrements sédimentaires de plusieurs centaines à milliers d'années. Ceci sera réalisé en couplant une approche spectroscopique utilisant le rayonnement synchrotron et une approche isotopique sur des carottes datées.

Ce travail apportera des résultats nouveaux sur l'évolution à long terme du comportement de l'uranium en milieu réducteur, informations indispensables pour mieux évaluer la sûreté des sites de stockage de déchets nucléaires de faible activité. Dans le même temps, le travail apportera des contraintes fortes sur l'acquisition et la conservation du signal isotopique enregistré par l'uranium lors de la diagenèse des sédiments.

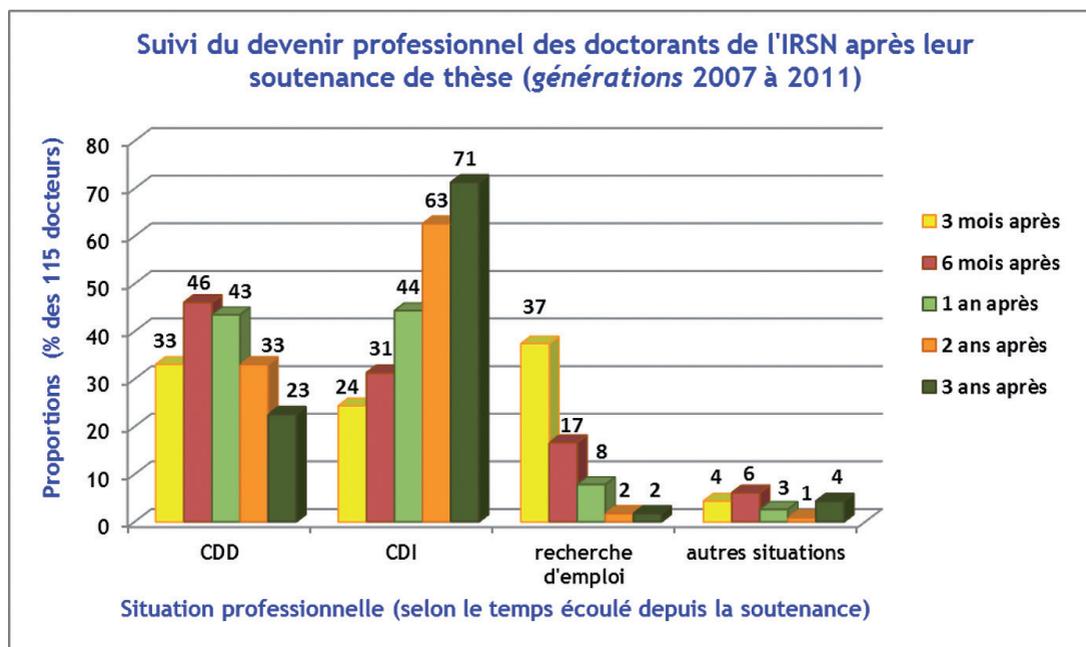
DEVENIR PROFESSIONNEL DES DOCTORANTS DE L'IRSN DE 2009 A 2016  
(DOCTEURS GENERATIONS 2007 A 2015)

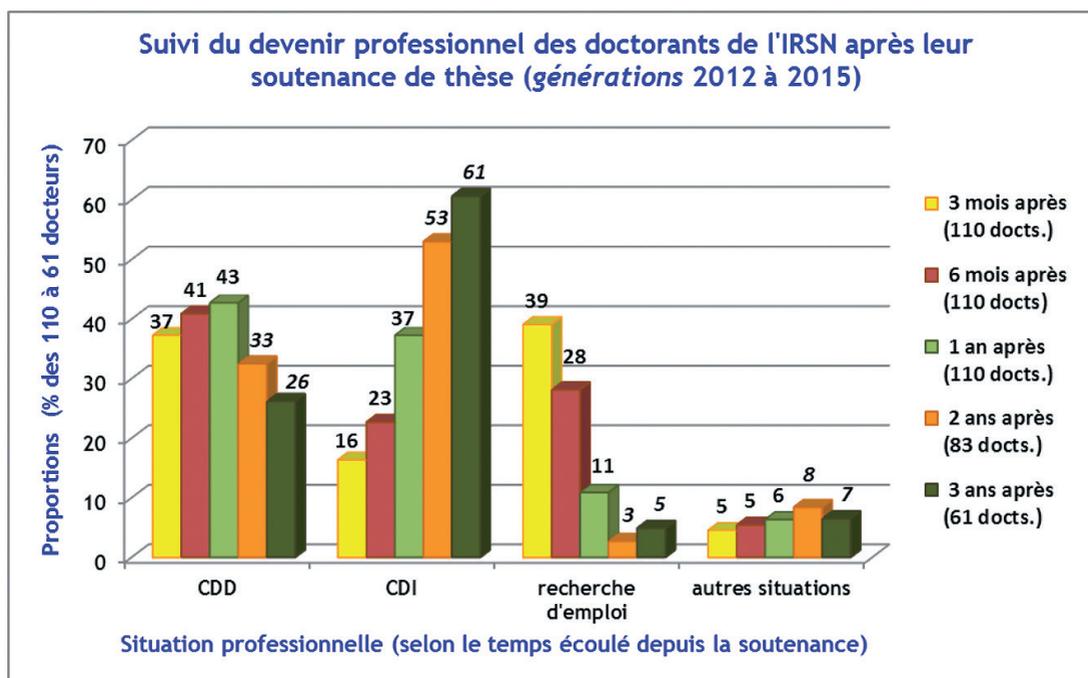
Irène SOROKINE-DURM (DSDP /SPS)

Plus d'une centaine de doctorants et de post-doctorants sont présents annuellement à l'IRSN. La première expérience professionnelle scientifique de longue durée des doctorants s'acquière au cours de leurs 3 ans de thèse. Une enquête annuelle auprès des tuteurs de thèse permet de connaître la situation professionnelle des nouveaux diplômés à diverses périodes après leur départ de l'Institut (3 mois-, 6 mois-, 1 an-, 2 ans- et 3 ans après leur soutenance de thèse). Les enquêtes IRSN réalisées de 2009 à 2016 auprès des tuteurs de thèse ont permis de collecter des informations qui, complétées par des recherches sur Internet, reconstituent les parcours professionnels de 225 ex-doctorants de l'Institut (9 générations de docteurs).

Face aux évolutions permanentes du *monde de la recherche* et de son environnement, le suivi de carrière de l'ensemble de ces 225 docteurs a été subdivisé en 2 contingents ne couvrant pas plus de 5 années chacun : les diplômés de 2007 à 2011 (115 docteurs constituant 5 générations de docteurs) et ceux de 2012 à 2015 (110 docteurs, 4 générations dont le suivi des plus récentes ne couvre pas encore 3 ans).

Les figures ci-dessous documentent la comparaison en termes de type de *contrat*, *contrats à durée déterminée (CDD)* ou *indéterminée (CDI)*, en termes de *recherche d'emploi* ou en termes d'*autres situations* (reprises d'études ou de formations, professions indépendantes ou diverses raisons familiales, ces dernières ne pouvant pas être considérées comme des *recherche d'emploi*).





Trois mois après la soutenance de thèse, seuls 37- à 39 % des docteurs issus de l'IRSN en 2007 – 2015 sont encore en recherche d'emploi. A 3 ans post-soutenance de thèse, cette valeur n'est plus que de 2- à 5 %, ce qui est mieux que les données des diverses enquêtes statistiques françaises qui s'accordent sur des taux de chômage à 3 ans de l'ordre de 6- à 10%, données variant selon le type d'enquête<sup>1</sup> et selon les domaines scientifiques des doctorats.

En ce qui concerne les délais d'obtention d'un premier contrat de travail, 64 - à 77% des docteurs IRSN générations 2007-2015 obtiennent un contrat dans le deuxième semestre après leur soutenance de thèse, que ce soit un CDD ou un CDI. Ces données sont comparables aux 79% du taux d'emploi des diplômés de doctorat de l'Ile-de-France de 2014<sup>2</sup> lors de l'enquête réalisée au printemps 2015 par *Adoc talent management* (c'est-à-dire quelques mois après l'obtention des doctorats).

Si le premier emploi occupé par les ex-doctorants de l'IRSN est plutôt un emploi à durée déterminée, dès 1 an post-soutenance de thèse le nombre d'emplois permanents est de 37 - à 44% de CDI, valeurs proches de celles de l'enquête ministérielle *MESRI / SIES* pour les diplômés de 2012, 1 an après l'obtention de leur doctorat : 50,5% d'emplois stables dans les domaines des *Sciences et leurs interactions*<sup>3</sup> et 41,9% pour les *Sciences du vivant*.

Enfin, trois ans après leur thèse, 90- à 95% des docteurs issus de l'IRSN en 2007-2015 ont trouvé un emploi, avec 61- à 71% d'emplois permanents, à rapprocher des 67 - à 69% d'emplois permanents des docteurs générations 2012 et 2013 des dernières enquêtes ministérielles *MESRI / SIES* et *CEREQ*.

1. CEREQ, MESRI/SIES, *Adoc talent Management*, etc.

2. Rapport Emploi 2015, *La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en Ile de France*, 3e édition, *Adoc talent management*.

3. C'est-à-dire : mathématiques et leurs interactions, physique, sciences de la Terre et de l'Univers, Espace, chimie et sciences des matériaux, sciences pour l'ingénieur et sciences et TIC.



## Comment nous rejoindre ?

Pour adhérer, 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 !)

Vous avez envie de vous investir et de dynamiser le réseau des doctorants de l'IRSN ?  
Candidatez au bureau de l'AD'U[N] !



Une seule adresse :



[adin.asso.irsn@gmail.com](mailto:adin.asso.irsn@gmail.com)

**Kossi A.**  
Secrétaire

**Mariam B.**  
Vice-Trésorière

Notre équipe



**Céline S.**  
Présidente

**Hugues D.**  
Vice-Président

**Sékolène L.**  
Trésorière

**Annaïg B.**  
Vice-Secrétaire



Association des  
THEsards de Cadarache



**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



### Centre de Cadarache

Grand pôle de recherche sur les énergies  
2150 salariés CEA - 500 salariés IRSN  
350 doctorants, stagiaires, apprentis  
1000 salariés d'entreprises extérieures



CEA Cadarache  
13108 St Paul lez Durance Cedex

Retrouvez de nombreuses informations sur notre site

[www.asthec.org](http://www.asthec.org)

Et n'hésitez pas à nous contacter via l'adresse

[contact@asthec.org](mailto:contact@asthec.org)



### || Sorties sportives

Une région riche et variée qui permet de faire : des **randonnées**, des descentes du Verdon en **kayak**, ...



### || Sorties mondaines

Des **soirées** dans un restaurant ou activité particulière (billard, bowling, etc...) souvent sur Aix en Provence.



### || Visite de labo

De nombreuses installations à découvrir sur le centre qui permettent des **visites** autour de croissants et pains au chocolat.



### || Visite grand site

Une visite annuelle d'installation majeure de recherche ou industrielle est organisée.

**ESRF** (*European Synchrotron Radiation Facility*) - 2012

**Centrale EDF de Tricastin**



### || Weekend d'intégration

Afin de ne pas se sentir seul, un **Week-End d'Intégration** ou WEI est organisé dans le but de faire connaissance et prendre un peu de bon temps. J

L'année dernière :

- Nuit dans un grand gîte au Colorado Provençal,
- Randonnée,
- Dégustation de vin et de produits locaux,
- Laser game...



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



**Pour exploiter les connaissances  
internes et externes dont vous avez  
besoin pour vos projets de recherche.**

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

ou

Depuis le portail iris, cliquez sur :



Extrait du livre de Sidney Harris : Quoi ! c'est ça le big bang ? aux éditions du Seuil.

# 1 brevet IRSN sur 3 résulte d'une thèse !



## Et vous ?

*Protégez vos résultats scientifiques !*

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

ou

*Depuis le portail iris, cliquez sur :*



## LISTE DES PARTICIPANTS ET INDEX DES PRÉSENTATIONS

Kossi Dovéné ABALO	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LEPID	98
Christelle ADAM	IRSN / PSE-SANTE	
Ismail ALJ	IRSN / PSN-RES / SEREX / LR2E & IFSTTAR	70
Arnaud ALLERA	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	118
Frédéric ALONZO	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Abdellah AMRI	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / UEMIS	99
Sophie ANCELET	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LEPID	
Christophe ARDOIS	IRSN / PSE-ENV / SAME / LMRE	
Olivier ARMANT	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Laurent AUDOUIN	IRSN / PSN-RES / SA2I / LIE	
Jean BACCOU	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	
Christophe BADIE	Public Health England	
Oumar Telly BAH	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LRC	86
Stéphane BAIZE	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	
Carina BALLAND	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	
Gauzelin BARBIER	IRSN / DSDP / SPS	
Marc BARRACHIN	IRSN / PSN-RES / SAG / LETR	
Anne-Sophie BAYETO	CT INGENIERIE	
Marion BELLONI	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LEPID	26
Mariam BEN KACEM	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	15
Annaïg BERTHO	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	56
Nathalie BERTRAND	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BEHRIG	
Ibrahim BITAR	IRSN / PSN-EXP / SES / LMAPS	
Benjamin BLAISOT	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	21
Juan Antonio BLANCO	CNRS / IN2P3 / LPSC	80
Bernard BONIN	CEA	
Jean-Michel BONNET	IRSN / DSDP	
Alice BONTEMPS	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	25
Jean-Marc BONZOM	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Loïc BOSLAND	IRSN / PSN-RES / SAG / LETR	
Marine BOUDIAS	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LELI	100
Thierry BOURGOIS	IRSN / DSDP / SPS	
Soleiman BOURROUS	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	
Germain BOYER	IRSN / PSN-RES / SA2I / LIE	
François BRÉCHIGNAC	IRSN / DG	
Manon BRITEL	IRSN / PSN-SRDS / SHOT / LSHS - INSERM	12
Clément BROSSARD	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	101
Mariya BROVCHENKO	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	
Alain BRUNISSO	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	
Patrice BUESO	IRSN / DSDP	
Aurélié BUSSET	IRSN / DRH / SPEAT	
Virginie CAMILLERI	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Elsa CANTABELLA	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	102

Robert CAULK	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	103
Isabelle CAVALIE	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Hamza CHAIF	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	74
Alain CHAPEL	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	
Sylvie CHARRON	IRSN / DSDP / SCOSI	
Thomas CHARTIER	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN - ENS Paris	33
Rafael CHAVES DEPTULSKI	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	44
Jean-Baptiste CLAVEL	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	
Julie COLNOT	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LDRI	14
Catherine COSSONNET	IRSN / PSE-ENV / SAME / LMRE	
Delphine COSTA	IRSN / PSN-RES / SCA / LEMAC - UPEC	119
Stéphanie DARE-DOYEN	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED	
Sylvain DAVID	CNRS	
Audrey DE SANTIS	Umeps Communication	
Anne De VISMES OTT	IRSN / PSE-ENV / SAME / LMRE	
Christophe DEBAYLE	IRSN / PSE-ENV / SEDRE	
Hugues DELATTRE	RSN / PSE-ENV / SCAN / BEHRIG	104
Adrien DELAVAL	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	105
Hugues DELORME	EAMEA Cherbourg, Ministère de la Défense	
Alexis DÉPÉE	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	87
Aurélié DESBRÉE	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LEDI	
Jean DESQUINES	IRSN / PSN-RES / SEREX / LE2M	
Céline DINOCOURT	IRSN / DSDP / SPS	
Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN	IRSN / PSN-RES / SEREX / LE2M	120
Grégoire DOUGNIAUX	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	
Brigitte DUBOIS	IRSN / DSDP / SPS	
Céline DUFFA	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	
Élizabeth DUFOURCQ SEKATCHEFF	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	106
Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC	IRSN / PSE-SANTE / SESUC / BMCA	90
Éric DUMONTEIL	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	
Benoit DURVILLE	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC	
Magdalena DYMITROWSKA	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	
Teni EBRAHIMIAN CHIUSA	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	
Moulay Saïd EL YOUSOUFI	LMGC / Université de Montpellier	
Michel ENAULT	IRSN / DRH	
Frédérique EYROLLE	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	
Christine FASSERT	IRSN / PSN-SRDS / SHOT / LSHS	
Laureline FEVRIER	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	
Florian FICHOT	IRSN / PSN-RES / SAG / LEPC	
Alexandre FIGUEIREDO	IRSN / PSN-RES / SAG / LETR	84
Magali FLORIANI	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Alexandre FLOURET	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	75
Evelyne FOERSTER	CEA Paris Saclay, Institut SEISM	
Gauthier FONTAINE	IRSN / PSN-SRDS / SHOT / LSHS	121
Agnès FRANÇOIS	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	

Sandrine FRELON	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Béatrice GAGNAIRE	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Bassam GAMAL	IRSN / PSN-RES / SA2I / LIE	122
Laurent GARCIA-SANCHEZ	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2T	
Laura GASTALDO	IRSN / PSN-RES / SA2I / LIE	
Céline GELIS	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	
Vincent GEORGENTHUM	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	
Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	107
Rodolphe GILBIN	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Ludivine GILLI	IRSN / DSDP / SCOSI / BIIPE	
Patrice GIORDANO	IRSN / PSN-RES	
Richard GONZALEZ	IRSN / PSN-RES	
Alkiviadis GOURGIOTIS	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LELI	
Quentin GRANDO	IRSN / PSN-RES / SEREX / LR2E	
Anne Cécile GREGOIRE	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC	
Rémi GUÉDON	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	66
Yann GUEGUEN	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRSI	
Noémie GUIRANDY	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	108
Rodolfo GURRIARAN	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LR2A	
Isabelle GUYOT	IRSN / DSDP / SCOSI / BIIPE	
Azza HABIBI	IRSN / PSE-ENV / SAME / LERCA	
Yasser HAMDY	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BEHRIG	
Daniel HARDY	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA - University of Bristol	123
Didier HEBERT	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LRC	
Gwenaél HOARAU	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	51
Sébastien HOK	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	
Hanaa HOUJEIJ	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC - PC2A Lille	85
Christelle HUET	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LDRI	
Christelle IBANEZ	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	
Jacques JABBOUR	IRSN / PSN-EXP / SES / LMAPS	
Manon JACQUEMIN	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LEDI	55
Thomas JAILIN	IRSN / PSN-RES / SEREX / LE2M	78
Clément JEANNESSON	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	94
Ekoé KANGNI-FOLI	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	45
Irène KORSAKISSOK	IRSN / PSE-SANTE / SESUC / BMCA	
Amel KORT	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	50
Ségolène LADAIGUE	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	109
Patrick LALOY	IRSN / DSDP / SPS	
Maria LANCIERI	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	
Alexia LAPIÈRE	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	57
Ngoc Bao Tran LE	IRSN / PSE-SANTE / SESUC / BMCA	91
Luiz LEAL	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	
Audrey LEBEAU-LIVÉ	IRSN / DSDP / SCOSI / BOS	
Lena LEBRETON	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EP	
Catherine LECOMTE	IRSN / PSE-ENV / SRTE	

Pierre LEFEBVRE	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LELI - IMPMC Sorbonne Université	135
Audrey LEGENDRE	IRSN / DSDP / SCOSI / CRIS	
Maëva LELOIRE	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC - UCCS	18
Nathalie LEMAITRE	IRSN / DSDP	
Pascal 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	46
Hantao LIN	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	124
Thierry LOISEAU	UCCS / Université de Lille	
Léo MACE	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	110
Jeanne MALET	IRSN / PSN-RES / SCA / LEMAC	
Sandrine MARANO	IRSN / DSDP / BC2S	
Pierre MARBACH	IRSN / DSDP / SPS	
Philippe MARCH	IRSN / PSN-RES / SA2I	
Christophe MARQUIE	IRSN / PSN-RES / SEREX	
Jimmy MARTIN	RSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	125
Marguerite MATHEY	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN - ISTERRE, Université Grenoble Alpes	36
Romain MEINIER	IRSN / PSN-RES / SA2I / LEF	28
Vincent MIGNOTTE	Association Bernard Gregory	
Fabien MILLIAT	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	
Joachim MISS	IRSN / DSDP / SPS	
Sofia M'JAHAD	EDF R&D - Lab Paris-Saclay	
Yann MONERIE	Université Montpellier	
Céline MONSANGLAN-LOUVET	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	
Arnaud MONTABERT	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN - ENS	38
Amandine MOREREAU	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LRTA	72
Jean MULLER	RSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	126
Sophia MURAT EL HOUDIGUI	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	65
Georges NAHAS	IRSN / PSN-EXP / SES / LMAPS	
Shambhavi NANDAN	IRSN / PSN-RES / SAG / LEPC	40
Philippe NERISSON	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC	
Jean-Christophe NIEL	IRSN / DG	
Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	60
Fiiia-Charlotta NURMINEN	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN Universita di CHIETI Italie	111
Jonathan NUVOLI	IRSN / PSN-RES / SCA / LECEV	19
François-Xavier OUF	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	
Florian OUVRIER-BUFFET	IRSN / PSN-RES / SEREX / L2EC	69
Vincent PAGET	IRSN / PSE-SANTE / SERAMED / LRMed	
Mélody PALLU	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LDRI - LPC2E Université d'Orléans	112
François PAQUET	IRSN / PSE-ENV / SRTE	

Samuel PEILLON	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	20
Kathleen PELÉ	IRSN / PSN-RES / SEMIA, LMGC et ECM	61
Céline PELISSOU	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	
Marie-Hélène PERTUISOT	IRSN / DSDP / SCOSI / BOS	
Arthur PICHELIN	IRSN / PSN-EXP / SES / LMAPS	68
Emmanuel PORCHERON	IRSN / PSN-RES / SCA / LPMA	
Loïc QUEVAREC	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	113
Narintsoa RANAIVOMANANA	LMDC / INSA Toulouse	
François REBIERE	IRSN / PSE-SANTE / SESANE	
Nicolas REY	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	24
Benjamin RICHARD	IRSN / PSN-EXP / SES / LMAPS	
Zeinab RIDA	IRSN / PSN-RES / SCA / LEMAC	127
Aya RIMA	IRSN / PSN-EXP / SES - CSTB, ENS Paris-Saclay	128
Mathias ROGER	IRSN / PSN-SRDS / SHOT / LSHS	32
André ROUBAUD	IRSN / PSN-RES	
Emmanuel ROUGÉ	IRSN / PSN-RES / SEREX / LE2M	
Véronique ROUYER	IRSN / PSN-RES	
Pierre RUYER	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	
Zakaria SAADI	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / UEMIS	
Vivian SALINO	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	129
Rihab SASSI	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	114
Olivier SAUNIER	IRSN / PSE-SANTE / SESUC / BMCA	
Oona SCOTTI	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	
Céline SERRANO	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LRTOX	64
Jianwei SHI	IRSN / PSN-RES / SA2I / LIE	29
Olivier SIMON	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	
Sophie SOBANSKA	ISM - CNRS BORDEAUX	
Adrien SOCIÉ	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	47
Irène SOROKINE-DURM	IRSN / DSDP / SPS	
Audrey SOULOUMIAC	IRSN / PSE-ENV / SRTE / LECO	73
Karine TACK	ASN	
Nicolas TANG	IRSN / PSE-SANTE / SDOS / LDRI	54
Ayedah TARIQ	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	115
Tatiana TAURINES	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	
Flomin TCHAWÉ NZIAHA	IRSN / PSE-ENV / SCAN / BERSSIN	37
Léa TILLARD	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	95
Marie-Pierre VÉRAN-VIGUIÉ	IRSN / DRH / SFDC	
Alejandro VILLARREAL LARRAURI	IRSN / PSN-RES / SAG / LEPC	41
Pierre-Guy VINCENT	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LPTM	
Christophe VOLKRINGER	UCCS / Université de Lille	
Romain VUIART	IRSN / PSN-EXP / SNC / LN	130
Valentin WALKER	IRSN / PSE-SANTE / SESANE / LEPID	13
Charles WITTEBROODT	IRSN / PSE-ENV / SEDRE / LETIS	
Jiaxin XU	IRSN / PSE-ENV / SAME / LMRE	52
Pascal ZAVALETA	IRSN / PSN-RES / SA2I / LEF	
Zhenhai ZOU	IRSN / PSN-RES / SEMIA / LIMAR	79

## 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

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

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

LPMA : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

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

LEF : Laboratoire d'Expérimentation des Feux

LIE : Laboratoire de l'Incendie et des Explosions

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

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

LN : Laboratoire de Neutronique

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

BEGC : Bureau d'Expertise du Génie Civil

LMPAS : Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performance des Structures

#### **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 - SANTE : Thématique Santé**

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

LDRI : Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants

LEDI : Laboratoire d'évaluation de la dose interne

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

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

LRMed : Laboratoire de Radiobiologie des expositions médicales

**PSE - SANTE / SESANE** : Service de recherche sur les effets biologiques et sanitaires  
des rayonnements ionisants

LEPID : Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants

LRTOX : Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale

**PSE - SANTE / 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

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

**PSE - ENV / SRTE** : Service de recherche sur les transferts et les effets des radionucléides  
sur les écosystèmes

LECO : Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides

LR2T : Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides  
dans les écosystèmes terrestres

LRC : Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville

LRTA : Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides  
dans les écosystèmes aquatiques

*Les Journées thèses sont organisées par la Direction de la stratégie,  
du développement et des partenariats (DSDP).*

Réalisation du livret 2019 : Céline Dinocourt, Brigitte Dubois, (IRSN) et Véronique Laget, maquettiste.

**Gabarit au format :  
pages intérieures**

**Coupe : 185 X 265 mm**

**Dans les paramètres d'impression  
imprimer à 100 %**

265 mm

185 mm