



**HAL**  
open science

## Livret des thèses 2020

Céline Dinocourt, Brigitte Dubois, Véronique Laget

► **To cite this version:**

Céline Dinocourt, Brigitte Dubois, Véronique Laget. Livret des thèses 2020. Journée des thèses, pp.1-79, 2020. irsn-04370481v2

**HAL Id: irsn-04370481**

**<https://irsnow.hal.science/irsnow-04370481v2>**

Submitted on 18 Oct 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



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IRSN**

INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# LIVRET DES THÈSES 2020

MEMBRE DE

**ETSON**

# Édito

Pour 2020, rendez-vous était pris du 23 au 26 mars au domaine Ker Juliette à Pornichet. Tout était prêt pour accueillir la centaine de doctorants IRSN et un nombre équivalent de chercheurs de l'Institut et des établissements partenaires à l'occasion d'une nouvelle édition des journées des thèses. Une particule microscopique infectieuse d'à peine cent nanomètres en a toutefois décidé autrement en plongeant la moitié de l'humanité dans un confinement forcé.

Alors qu'ils s'apprêtaient à passer trois jours de rencontre, de convivialité et d'effervescence scientifique, les membres de la communauté scientifique de l'IRSN se sont retrouvés cloîtrés chez eux, loin de leurs laboratoires et de leur collègues. Cette période a duré plus de deux mois et s'est souvent avérée difficile à vivre sur le plan psychologique et parfois matériel. Bien que le coronavirus SARS-CoV-2 n'ait pas totalement desserré son étreinte, les activités ont depuis progressivement repris et chacun peut à nouveau se projeter dans le futur. Parallèlement, il est essentiel de retisser les liens qui unissent les chercheurs de l'institut et de veiller à ce que les doctorants trouvent toute leur place dans ce collectif.

Le présent livret a vocation à contribuer, modestement, à cette ambition en mettant en lumière la richesse que recèlent les travaux des doctorants de l'IRSN. Il regroupe pour cela les résumés des cent un sujets qui devaient constituer le programme des journées des thèses. Organisés selon les quinze thématiques portées par les trois unités de recherche de l'IRSN - santé, environnement et sûreté - ces résumés illustrent toute la diversité des recherches de l'Institut. Au travers des références croisées qu'il introduit, le livret souligne également les transversalités qui relient entre elles certaines thématiques : le vieillissement des structures et équipements et le stockage géologique profond ou les risques environnementaux et la dosimétrie et métrologie des rayonnements ionisants, par exemple.

Je vous invite donc vivement à parcourir ce livret, à découvrir la diversité des sujets et, pourquoi pas, à prendre contact avec nos doctorants pour en savoir plus sur leurs travaux.

Et je vous donne bien sûr rendez-vous dès le printemps prochain pour l'édition 2021 des journées des thèses, en espérant qu'elle puisse se dérouler dans des conditions permettant de renouer avec l'esprit d'échange et de convivialité qui en constitue l'ADN.

Didier GAY  
Adjoint au directeur de la stratégie, délégué aux affaires scientifiques

# Radioprotection de l'Homme

## ► Dosimétrie et métrologie des rayonnements ionisants

Dosimétrie :

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

**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.

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

Métrologie des rayonnements ionisants :

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

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

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

## ► Radiobiologie et radiopathologie

Caractérisation de la relation entre les caractéristiques physiques des rayonnements ionisants et les effets biologiques précoces

**Kévin LALANNE** - Microfaisceau d'ions pour la radiobiologie : simulations d'irradiations et développement pour les ions plus lourds que l'hélium sur l'installation MIRCOM.

Modélisation de la réponse moléculaire globale des cellules endothéliales à l'irradiation

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

Validation *in vivo* des hypothèses physio-pathologiques à l'origine du risque des complications des radiothérapies via l'utilisation de modèles animaux transgéniques innovants

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

## ► Contremesures médicales

Développer des traitements innovants des séquelles des radiothérapies

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

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

Développer des traitements innovants des lésions et syndrômes radio-induits

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

Développer des traitements dans le cas d'une contamination interne

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

## ► Radiotoxicologie

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

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

**Céline SERRANO** - Étude de l'apprentissage et de la mémoire spatiale à long terme après une exposition postnatale ciblée du cerveau ou du gyrus denté dorsal à des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants : rôle de la neurogénèse et du microenvironnement hippocampique.

## ► Épidémiologie

Mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques

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

**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.

**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.

La cohorte des travailleurs du cycle de l'uranium

**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.

# Environnement

## ► Stockage géologique profond

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

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

**Robert CAULK** - Modelling the evolution of porosity distributions in compacted clay pellets during imbibition.

**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.

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

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

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

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

## ► Risques environnementaux

### Transfert des radionucléides dans l'environnement en situation d'exposition chronique

**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.

**Adrien DELAVAL** - Modélisation des transferts de radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer.

**Nathan BODEREAU** - Origine et spéciation du  $^{14}\text{C}$  dans les cours d'eau.

**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.

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

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

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

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

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

### Travaux référencés dans la démarche de recherche

#### « Dosimétrie et métrologie des rayonnements ionisants »

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

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

### Transfert des radionucléides dans l'environnement en situation d'exposition accidentelle

**Hanaa HOUJEIJ** - Étude expérimentale des réactions de capture/désorption des iodes gazeux ( $\text{I}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ) sur des aérosols environnementaux.

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

**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.

**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.

### Améliorer l'évaluation du risque radiologique aux écosystèmes

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

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

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

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

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

**Clément CAR** - Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants.

**Audrey SOULOUMIAC** - Étude mécaniste et écophysiologique du transfert du carbone 14 chez la Carpe commune (*Cyprinus carpio*).

## ➤ Aléas naturels

**Rihab SASSI** - Rupture dynamique 3D sur des géométries de failles complexes pour étudier les aléas ruptures de surface et mouvement sismique en champ proche.

**Flomin TCHAWÉ NZIAHA** - Numerical simulations of seismic wave propagation in complex media: impact of the spatial variability of soil properties on seismic ground motion.

**Fiiia NURMINEN** - Probabilistic fault displacement hazard analysis - Improved methodology and applications.

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

**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.

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

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

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

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

# Sûreté

## ➤ Cœur combustible Thermohydraulique

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

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

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

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

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

**Jimmy MARTIN** - Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation gravitaire en piscine de désactivation du combustible.

## ➤ Neutronique - Criticité

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

**Vivian SALINO** - Développement d'une méthode d'optimisation de calculs de cœur de 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.

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

## ➤ Fusion du cœur

**Aymeric EDELINÉ** - Étude des conditions de stabilisation d'un bain de corium dans un lit de débris après renoyage du cœur.

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

## ➤ Confinement Produits de Fission

### Comportement des PF – Réacteurs

**Sandra GYASI** - Étude de l'effet du zirconium sur la vaporisation et la dégradation des crayons en AIC en conditions accidentelles sévères.

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

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

### Dépôt / transfert (hors réacteurs)

**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.

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

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

**Gwenaél HOARAU** - Étude de l'évolution de la limite de détection et des faux positifs émis par les moniteurs de mesure de la contamination radioactive atmosphérique en situation de chantier de démantèlement.

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

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

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

#### Filtration

**Jonathan NUVOLI** - Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules appliquée à la filtration THE.

**Marie LECOQ** - Efficacité de filtration de médium métallique sous humidité.

**Maëva LELOIRE** - Capture de tétraoxyde de ruthénium et d'iode gazeux par des matériaux poreux : les Metal-Organic Framework.

**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.

#### Confinement statique

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

#### ► Incendie et explosion

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

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

**Corentin NOUGIER** - Étude de la dégradation de matériaux solides en feu soumis à des régimes de sous-oxygénation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé.

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

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

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

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

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

Travaux référencés dans la démarche de recherche  
« Dépôt / transfert (hors réacteurs) »

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

#### ► Vieillessement des structures et équipements des installations

##### Béton et ouvrages de génie civil

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

**Abdellatif AMMAR** - Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif du béton sur le développement des réactions de gonflement interne.

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

**Joffrey LHONNEUR** - Approche par changement d'échelles du vieillissement des bétons. Expérimentations et simulations numériques.

**Kathleen PELE** - Modélisation de la prédiction de fissures sur la base de descripteurs morphologiques locaux : application à la génération de microstructures équivalentes dans les études du vieillissement des matériaux cimentaires.

Travaux référencés dans la démarche de recherche  
« Stockage géologique profond »

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

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

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

##### Matériaux et composants métalliques

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

Travaux référencés dans la démarche de recherche  
« Stockage géologique profond »

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

#### ► Activité en SHS

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

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

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

# Radioprotection de l'Homme

## ➤ Dosimétrie et métrologie des rayonnements ionisants

### Dosimétrie :

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

**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.

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

### Métrologie des rayonnements ionisants :

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

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

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

## Sujet de la thèse :

**INDORI : Intégration des INcertitudes associées à la Dosimétrie personnalisée dans l'Optimisation des Radiothérapies Internes**

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

Jusqu'à aujourd'hui la plupart des protocoles de traitement en radiothérapie interne sont basés sur l'administration d'une quantité d'activité par unité de masse ou par surface corporelle pour tous les patients (traitement standard). Cependant, la biocinétique du radiopharmaceutique, très spécifique à chaque patient peut entraîner un sous-dosage de la quantité de radioactivité nécessaire à l'élimination des lésions ou à un surdosage pouvant induire une toxicité. Pour éviter ces écueils, de nouveaux protocoles sont en cours de développement, afin de prendre en compte la biocinétique propre au patient. Ceci permettra d'optimiser l'activité à administrer en trouvant un compromis entre le contrôle de la tumeur et les complications aux tissus sains. Cette optimisation doit être réalisée par l'estimation de la dose absorbée personnalisée, déterminée au mieux à partir des différentes données disponibles permettant d'évaluer la biocinétique individuelle, et d'adapter le modèle dosimétrique à la morphologie du patient. Cependant, évaluer la biocinétique et adapter le modèle numérique au patient à partir d'images nécessitent de nombreuses étapes sujettes à incertitudes (détermination du volume de la région cible, l'étalonnage, correction des effets dégradants les images...).

La quantification des incertitudes introduites par chacune des étapes ainsi que l'incertitude globale sur la dose absorbée et sur l'activité à administrer est nécessaire pour préciser la fiabilité et la qualité des calculs de dose absorbée et optimiser les protocoles.

Cette quantification des incertitudes sera réalisée par l'utilisation d'un réseau bayésien, méthode statistique parfaitement adapté grâce à sa souplesse, sa lisibilité et sa rapidité.

La première étape de la thèse est d'identifier, quantifier et modéliser les différentes sources d'incertitudes pour un protocole type.

Ensuite, un réseau bayésien sera développé pour estimer les incertitudes sur les doses absorbées et les activités à administrer.

Puis, ce réseau ainsi que des méthodes permettant d'inclure des données d'entrée aussi diverses que des images ou des prélèvements biologiques seront intégrés dans le logiciel IRSN OEDIPE. Enfin, en intégrant la notion d'utilité, ces réseaux peuvent être la base d'un système expert qui renseignerait le praticien sur de potentiels examens supplémentaires permettant de réduire l'incertitude sur la dose absorbée. Ces examens pourraient être de nouvelles acquisitions d'images ou des analyses biologiques.

## 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**

Doctorant : Manon JACQUEMIN  
 Date du début de la thèse : 03/10/2016  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SDOS/LEDI  
 Tuteur de thèse : Aurélie DESBRÉE  
 Directeur de thèse : Didier FRANCK - IRSN  
 École doctorale : Université Paris-Saclay - PHENIICS  
 Financement de thèse : 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 en raison d'une forte variabilité des paramètres de marquages utilisés 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 corrélés 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  $\beta^+$  et de déterminer les paramètres de marquage qui minimisent les effets aux cellules.

La dosimétrie a reposé sur un modèle générique qui s'applique à tout type de radionucléide et de distribution cellulaire, à partir de facteur S calculés avec MCNP6 décrivant l'énergie déposée d'une cellule à une autre à des distances variables.

Dans un premier temps, une étude systématique de l'effet sur la dose absorbée à la cellule de la densité cellulaire et l'efficacité de marquage a été réalisée pour trois radiopharmaceutiques :  $^{18}\text{F}$ -FDG,  $^{64}\text{Cu}$ -PTSM et  $^{68}\text{Ga}$ -DOTA-peptide. Les résultats ont permis notamment 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. Ensuite, en explorant une approche basée sur l'utilisation de fonctions de distribution radiale dérivées du logiciel LAMMPS, l'influence de la conformation spatiale des cellules sur la dose a été étudiée.

Dans un second temps, des expériences de marquage de cellules mésenchymateuses (adMSC) et lymphoblastoïdes JURKAT au  $^{18}\text{F}$ -FDG ont été réalisées.

D'abord, l'influence des différents paramètres expérimentaux *i.e.*, densité cellulaire, activité volumique et temps d'incubation, sur l'efficacité de marquage a été caractérisée. Puis, des tests fonctionnels permettant de quantifier la survie clonogénique, le cycle cellulaire, et la cinétique d'apparition et réparation de cassures double brins ont été réalisés sur des cellules marquées avec une gamme d'activité. Les activités ont été sélectionnées de façon à ce que les doses absorbées aux cellules résultantes se trouvent entre 0 et 4 Gy pour les JURKAT et 0 et 10 Gy pour les adMSCs, à partir d'un modèle dosimétrique précis prenant en compte toutes les étapes du radiomarquage.

En perspectives, des irradiations externes vont être réalisées afin de comparer les effets observés à ceux obtenus après radiomarquage.

## Sujet de la thèse :

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

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

Les flashes gamma terrestres (TGF) sont des flashes de rayons gamma de très courtes durées (< 1 ms) mais de très hautes énergies (jusqu'à quelques dizaines de MeV) produits dans des orages communs, dans la moyenne atmosphère (~12 km) et sont associés aux éclairs intra-nuages, qui sont les plus fréquents.

Produits par les mêmes mécanismes physiques, les *Gamma ray Glows* sont des élévations du rayonnement de fond lors d'orages, pendant des durées > 1 seconde. 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].

Très peu de mesures dosimétriques ont pu être réalisées pour évaluer l'exposition des personnels navigants (PN) à ces phénomènes et des évaluations par calcul déjà publiées [Dwyer *et al.*, JGR, 115, D09206, 2010] avancent des niveaux de dose potentiellement supérieurs aux doses annuelles maximales reçues par les PN avec le rayonnement cosmique. Il convient donc d'estimer au mieux les niveaux d'exposition et les probabilités associées.

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

Nous avons réalisé de nouvelles simulations qui nous ont permis d'établir des niveaux d'exposition dans le faisceau du TGF et à proximité en fonction de paramètres tels que la taille du faisceau et avec deux modèles différents de production des électrons runaway (électrons relativistes à l'origine de ces événements), sachant que le mécanisme d'initiation des TGF est encore mal connu. Pour mieux comprendre ces phénomènes, nous réaliserons en 2020 des premières mesures sous ballon sonde dans les orages dans le cadre d'un projet CNES. Une nacelle de mesure dédiée alliant spectrométrie gamma et mesure de champ électrique est en cours de finalisation. Dans le cadre de ce travail, un programme de mesure en vol sur des lignes régulières en collaboration avec Air France est également à l'étude pour mieux appréhender le risque associé.

## Sujet de la thèse :

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

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

L'iode, halogène volatil, peut exister sous différents états d'oxydation. Des 25 isotopes que possède l'iode, l'iode 129, produit de fission de l'uranium 235 et du plutonium 239, est le radio-isotope ayant la période la plus longue (16,1 millions d'années). Il est d'une part rejeté dans l'atmosphère et dans l'environnement marin de façon chronique par certaines usines de retraitement du combustible usé tel que l'usine ORANO La Hague. L'iode 129 peut être transféré de l'environnement marin vers le littoral par émission d'aérosols ou de gaz. D'autre part, en situation post-accidentelle, ce radionucléide pourrait être un excellent traceur de l'iode 131 dont la courte période (8,03 jours) entrave la quantification. L'iode étant facilement absorbé par la thyroïde, il importe dès lors de quantifier le rapport isotopique  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  et la concentration en iode 129 afin d'appréhender son comportement biogéochimique.

Actuellement, les nombreuses techniques d'analyse de l'iode 129 existantes emploient souvent des solvants organiques dangereux et ont des limites de détection supérieures aux activités potentiellement mesurables dans l'environnement. Les étapes clés de l'analyse de ce radionucléide sont l'extraction des espèces iodées de la matrice, la purification et la mesure, souvent réalisée par spectrométrie *gamma*, par ICP-MS (Spectrométrie de Masse à Plasma Induit) ou SMA (Spectrométrie de Masse par Accélérateur). La spectrométrie de masse permet la détermination du rapport isotopique  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ .

L'objectif de cette thèse est de développer un protocole d'analyse de l'iode 129 applicable aux mesures de routine de surveillance de l'environnement, aux études de transfert et aux situations d'urgence radiologique. La méthode d'extraction de l'iode de la matrice devra non seulement être compatible avec d'importantes prises d'essai mais également prendre en compte la volatilité de cet élément. L'utilisation d'un ICP-MS triple quadripôle dernière génération permettra de diminuer les limites de détection grâce à l'utilisation de gaz de réaction visant à éliminer les interférents. Cette technique génère toutefois des effets mémoire qu'il conviendra d'éliminer. Les milieux d'extraction, de purification et de mesure devront être compatibles. Enfin, la mesure par ICP-MS sera validée avec des analyses croisées effectuées par SMA.

La mise en place de cette méthode d'analyse innovante permettra, grâce à la Plateforme Technique IRSN La Hague (PTILH), d'enrichir les données environnementales par la quantification de l'iode 129 émis par le compartiment marin et par la mesure du rapport isotopique  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  associé. De plus, en cas d'accident nucléaire, cette méthode permettra d'apporter une réponse rapide et précise répondant ainsi aux engagements de l'IRSN.

## Sujet de la thèse :

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

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

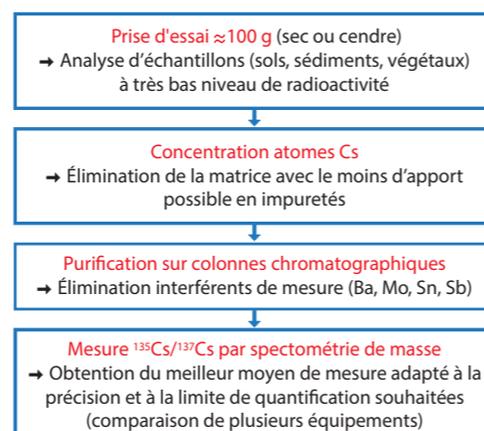
La signature isotopique des radioéléments est un outil permettant de caractériser les sources de contamination radioactive dans l'environnement. Concernant le césium, la mesure par spectrométrie *gamma* du rapport  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  permet d'identifier les contributions provenant des essais nucléaires atmosphériques, des accidents ou des rejets autorisés des centrales nucléaires.

Cependant, l'utilisation de ce rapport est limitée dans le temps à cause de la courte période radioactive de  $^{134}\text{Cs}$  (2,1 ans). De nos jours, 34 ans après l'accident de Tchernobyl,  $^{134}\text{Cs}$  n'est plus quantifiable dans les zones de rémanence françaises marquées par ces retombées.

Une alternative doit donc être trouvée pour disposer d'un nouveau marqueur des sources de  $^{137}\text{Cs}$  autant utile à la surveillance des rejets des installations qu'à l'expertise des sols et des sédiments contaminés en France.  $^{135}\text{Cs}$ , produit de fission à vie longue (2,3.10<sup>6</sup> ans), pourrait permettre de répondre à ce besoin à long terme.

L'utilisation du rapport  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  semble donc très prometteuse. Cependant, des verrous métrologiques existent. Une difficulté majeure est que la mesure de  $^{135}\text{Cs}$  ne peut pas être effectuée aisément et précisément par comptage nucléaire en raison de la nature du rayonnement émis par ce radionucléide ( $\beta^-$ ,  $E_{\text{max}}$  268,9 keV). Grâce aux développements réalisés lors des deux dernières décennies, la quantification des atomes de  $^{135}\text{Cs}$  par spectrométrie de masse est devenue possible au prix d'une radiochimie poussée et d'une mesure très performante, exempte d'interférents. Une autre difficulté est l'absence de traceur et de matériaux de référence certifiés en  $^{135}\text{Cs}$ .

Les enjeux de cette thèse sont donc multiples. La première partie de la thèse consistera à développer un protocole radiochimique très sélectif vis-à-vis du césium puis de le valider pour quantifier le rapport  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  au niveau environnemental et ainsi utiliser ce rapport comme nouveau marqueur dans l'identification des sources de contamination. La seconde partie de la thèse sera dédiée à l'application du protocole en analysant, pour la première fois en France, des échantillons provenant de plusieurs sites d'intérêts et ainsi contribuer à la connaissance du fond radiologique français qui est principalement dû aux essais nucléaires atmosphériques et à l'accident de Tchernobyl.



Stratégie pour le développement du protocole Cs

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Jiaxin XU  
 Date du début de la thèse : 02/10/2017  
 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/CEA-LNHB

Le laboratoire de métrologie de la radioactivité de l'environnement (LMRE) améliore continuellement les techniques de mesure pour identifier et quantifier les radionucléides présents à l'état de trace dans l'environnement dans le cadre de la surveillance de l'environnement radiologique, en support à la recherche en radioécologie ou en cas d'incident ou accident. En proposant de nouvelles approches en spectrométrie gamma afin de développer des outils d'analyse plus sensibles et plus rapides, les travaux de thèse s'inscrivent dans les questions scientifiques prioritaires de l'IRSN du domaine de la radioprotection.

En première année de thèse, nous avons travaillé sur l'estimation des activités basée sur le démélange spectral; cette nouvelle approche permet de traiter un spectre dans sa globalité et de prendre en compte la statistique de Poisson du processus physique de la détection. Les signatures spectrales étant connues, le démélange consiste à trouver les poids de mélange de chaque radionucléide, c'est-à-dire leur activité. Ce problème inverse est résolu par maximisation de la vraisemblance des poids de mélange, sous une contrainte de non-négativité.

En pratique, les radionucléides actifs (i.e. réellement présents) ne sont pas parfaitement connus ce qui nuit à l'efficacité de la procédure de démélange. Pour répondre à cette problématique, la modélisation parcimonieuse a été étudiée en deuxième année de thèse : l'ensemble des radionucléides actifs est estimé conjointement en sélectionnant dans une bibliothèque de signatures spectrales le plus petit nombre de radionucléides expliquant le mieux au spectre mesuré, en privilégiant les solutions parcimonieuses de l'algorithme d'estimation.

Les études faites sur des mesures de filtres de prélèvement d'aérosols ont montré que a), le temps nécessaire à la détection de  $^{137}\text{Cs}$  passait de plus d'une semaine à seulement 4 jours avec le démélange spectral, b) l'approche parcimonieuse permet d'estimer les radionucléides actifs en limitant les effets de sur-ajustement et les fausses identifications.

Dans cette dernière année, les approches développées seront appliquées pour analyser les mesures de routine. Il s'agit de réaliser l'analyse des spectres pour: a), quantifier les radionucléides avec la calibration des signatures spectrales b), dériver le taux de faux positifs afin d'évaluer les seuils de décision des résultats.

Enfin, afin de tirer parti des archives des mesures effectuées régulièrement, des méthodes récemment apparues dans l'apprentissage automatique (*deep learning*), consistant à apprendre le terme de régularisation à partir d'une archive des données, seront mises en œuvre afin d'améliorer la précision de l'estimation.

# Radioprotection de l'Homme

## ➤ Radiobiologie et radiopathologie

Caractérisation de la relation entre les caractéristiques physiques des rayonnements ionisants et les effets biologiques précoces

**Kévin LALANNE** - Microfaisceau d'ions pour la radiobiologie : simulations d'irradiations et développement pour les ions plus lourds que l'hélium sur l'installation MIRCOCOM.

Modélisation de la réponse moléculaire globale des cellules endothéliales à l'irradiation

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

Validation *in vivo* des hypothèses physio-pathologiques à l'origine du risque des complications des radiothérapies via l'utilisation de modèles animaux transgéniques innovants

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

## Sujet de la thèse :

## Microfaisceau d'ions pour la radiobiologie : simulations d'irradiations et développement pour les ions plus lourds que l'hélium sur l'installation MIRCOCM

Doctorant : Kévin LALANNE  
 Date du début de la thèse : 07/10/2019  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SDOS/LMDN  
 Tuteur de thèse : François VIANNA-LEGROS  
 Directeur de thèse : Didier TONNEAU – CINaM  
 École doctorale : Aix-Marseille Université / Physique et science de la matière  
 Financement de thèse : IRSN

L'un des axes de recherche de l'IRSN est d'approfondir les connaissances sur la genèse des effets biologiques suite à une irradiation et en particulier sur les effets secondaires dus à des traitements par radiothérapie, comme par exemple la protonthérapie et l'hadronthérapie, qui sont des domaines en forte expansion. Cependant, les conséquences à long terme de ces types de traitement sur les tissus sains restent encore assez mal connues.

C'est dans cette optique que l'installation MIRCOCM fut construite. Accueillant une ligne de microfaisceaux d'ions pouvant irradier des échantillons biologiques vivants, elle a notamment pour objectifs de permettre d'identifier et de prévenir les effets secondaires des radiothérapies et de faire le lien entre les grandeurs physiques macroscopiques et les phénomènes biologiques tissulaires, cellulaires, voire subcellulaires.

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

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

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

- Le premier consistera à modéliser l'intégralité de la ligne avec le code de calcul Monte-Carlo GEANT4. Cette modélisation permettra de simuler les différentes irradiations effectuées sur MIRCOCM et deviendra à terme un outil de référence pour les radiobiologistes qui travailleront sur cette installation. Cela leur permettra d'identifier les mécanismes physiques responsables des événements biologiques qu'ils observeront en comparant les données acquises expérimentalement à celles obtenues via les simulations.
- Le deuxième axe consistera à étendre l'éventail des ions disponibles afin de pouvoir effectuer des expérimentations plus diversifiées. Actuellement, la ligne permet de mener des campagnes d'irradiations avec deux types d'ions : des protons jusqu'à 4 MeV et des particules  $\alpha$  jusqu'à 6 MeV. Il s'agira donc, dans un premier temps, d'étudier les capacités de la ligne afin de délivrer des ions de type bore, carbone ou oxygène, puis de poursuivre cette étude dans le but d'obtenir des faisceaux d'ions plus lourds.
- Enfin, cette thèse est au cœur d'une collaboration avec le CINaM (Centre interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille) qui développe un détecteur de résolution spatiale sub-micrométrique qui permettra de connaître la géométrie du microfaisceau. Le troisième axe consistera donc à effectuer un travail d'adaptation de ce dispositif sur MIRCOCM.

L'ensemble de ces recherches permettront de connaître les performances et les limites de la ligne de microfaisceau d'ion MIRCOCM.

## Sujet de la thèse :

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

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

Le recrutement immunitaire chronique au niveau des tissus sains irradiés est une conséquence délétère de la radiothérapie. Les macrophages, un sous-type immunitaire, jouent un rôle dans l'apparition de complications radio-induites. Néanmoins, les mécanismes sous-jacents restent peu connus. Les monocytes, forme circulante des macrophages, interagissent étroitement avec les cellules endothéliales vasculaires afin d'entrer dans le tissu. L'objectif de ma thèse est de démontrer le rôle d'acteurs endothéliaux, comme les N-glycosylations hautement mannosylées (*high mannose*) ainsi que les récepteurs CCR2 et CX3CR1, dans le recrutement des monocytes post-irradiation. Cette thèse répond à l'objectif de l'IRSN de compréhension des effets secondaires résultants de l'utilisation des rayonnements ionisants en clinique.

Ce projet implique des approches *in vitro* et *in vivo*. *In vitro*, des tests d'adhésion et de transmigration endothéliale (TME) des monocytes (THP-1) après irradiation des cellules endothéliales (HUVECs) à 20 Grays ont été développés par vidéo-microscopie. Le rôle des *high mannose* a été précédemment publié par le laboratoire<sup>[1]</sup>. L'implication d'une  $\alpha$ -1,2-mannosidase (MAN1C1) dans ce processus est investigué par inhibition et surexpression. Des anticorps, compétiteurs et siRNA sont utilisés pour étudier CCR2 et CX3CR1. *In vivo*, l'étude du recrutement précoce des leucocytes post-irradiation, et du rôle des différents acteurs est en cours à l'aide d'un modèle murin de microscopie intravitale sur vaisseaux mésentériques après irradiation abdominale (18 Grays). Des animaux invalidés pour CCR2 ou CX3CR1, ou normaux après injection de compétiteurs nous permettront d'évaluer le rôle des différents acteurs.

Jusqu'à présent, un outil robuste a été mis au point pour évaluer la TME via le système InCuCyte S3. L'irradiation des HUVECs semble stimuler la transmigration des THP-1 de manière dose dépendante, de plus les expériences avec les anticorps suggèrent un rôle de CCR2. Le rôle des *high mannose* dans l'augmentation radio-induite de l'adhésion des THP-1 est déjà publié<sup>[1]</sup>, nous avons montré par stratégie d'inhibition que MAN1C1 semble réguler l'augmentation des *high mannose* à la surface des HUVECs post-irradiation. Enfin, les tests d'adhésion et de TME avec l'utilisation du ligand CX3CL1 suggèrent un rôle de CX3CR1.

Pour conclure, les tests *in vitro* suggèrent un rôle de CCR2, CX3CR1 et MAN1C1 à différentes étapes du recrutement des monocytes post-irradiation. Pour valider le rôle de MAN1C1, l'étude de l'impact de la surexpression de MAN1C1 sur l'adhésion monocyttaire et les *high mannose* est en cours. Enfin, une validation du rôle des différents acteurs *in vivo* est prévue prochainement une fois la technique de microscopie intravitale maîtrisée.

[1] Jaillet, C. et al. Radiation-induced changes in the glycome of endothelial cells with functional consequences. Sci. Rep. 7, [2017].

## Sujet de la thèse :

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

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

Aujourd'hui, la radiothérapie stéréotaxique est une alternative thérapeutique pour les 20 à 30% de patients à haut risque chirurgical, atteints de cancer bronchique primitif localisé. C'est une technique de haute précision balistique, permettant l'irradiation de très petits volumes, grâce à la convergence de mini faisceaux au centre de la cible. Cela autorise la mise en place de protocoles en hypofractionnement sévère avec des doses par fraction, dites ablatives, de 6 à 20 Gy. Cependant, certains patients développent des effets secondaires pulmonaires, comme des pneumopathies radiques de type inflammatoire ou fibreuse.

La stratégie du laboratoire vise à comprendre les mécanismes responsables de l'initiation et du développement des lésions radio induites aux tissus sains lors d'irradiations médicales, et doit s'adapter aux nouvelles pratiques de radiothérapie. Depuis l'acquisition par l'IRSN d'un irradiateur du petit animal (SARRP), le laboratoire a donc pu acquérir un recul sur les effets anatomopathologiques de l'irradiation stéréotaxique pulmonaire chez la souris, et a pu mettre en évidence un infiltrat macrophagique au niveau du site lésionnel. Les macrophages sont des cellules du système immunitaire, connues pour être impliquées dans les processus fibreux, y compris radio-induits.

L'objectif de ce projet de thèse est de déterminer le rôle des sous-populations macrophagiques dans le développement des lésions pulmonaires induites par une irradiation en conditions stéréotaxiques chez la souris.

Ce projet s'articule autour de 4 axes :

- **Quels sont les macrophages présents au sein du tissu pulmonaire irradié ?**

Pour répondre, différentes techniques seront utilisées : l'immunohistologie pour connaître la localisation des sous-populations de macrophages dans le poumon ; et la cytométrie en flux, effectuée sur des digestions de poumon et des lavages broncho-alvéolaires, pour quantifier précisément ces sous-populations.

- **Les macrophages présents dans les lésions radiques sont-ils issus des monocytes circulants ?**

Des expériences de parabioses seront réalisées entre des souris GFP (exprimant de manière constitutive la *Green Fluorescent Protein*, une manière d'identifier les cellules) et des souris sauvages afin de mettre en place une circulation commune, et observer l'apport de la circulation sanguine dans l'infiltrat macrophagique après irradiation stéréotaxique pulmonaire.

- **Peut-on influencer la sévérité des lésions radiques en limitant le recrutement des macrophages ?**

Les lésions radio-induites seront comparées entre les souris sauvages et des souris déficientes en CCR2 (récepteur impliqué dans le recrutement des monocytes), chez lesquelles le recrutement des macrophages est abrogé.

- **Caractérisation *in vitro* des macrophages issus des lésions radiques pulmonaires.**

Les macrophages isolés et mis en culture seront caractérisés au niveau génique. Leur influence sur d'autres types cellulaires, telles que les fibroblastes ou les cellules endothéliales, sera également étudiée.

## Radioprotection de l'Homme

### ► Contremesures médicales

#### Développer des traitements innovants des séquelles des radiothérapies

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

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

#### Développer des traitements innovants des lésions et syndrômes radio-induits

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

#### Développer des traitements dans le cas d'une contamination interne

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

## Sujet de la thèse :

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

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

Ce sujet de thèse s'intègre dans les programmes de recherche menés à l'IRSN visant 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.

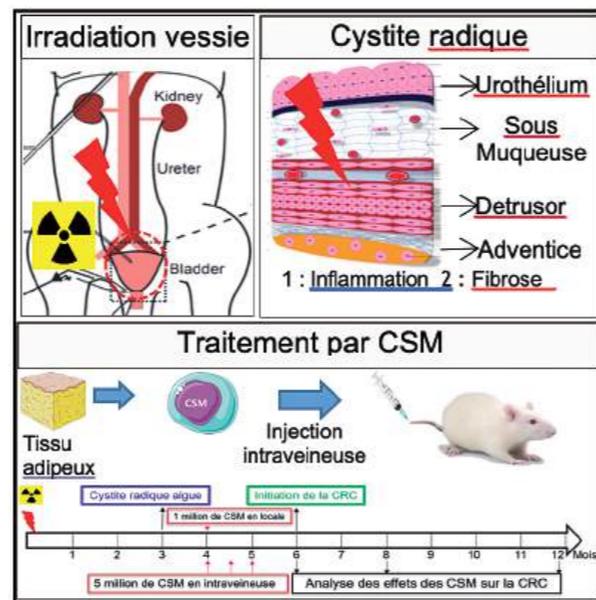
La cystite radique chronique (CRC) se caractérise par une inflammation chronique évoluant vers une fibrose avec des symptômes comme des douleurs et des saignements. Il n'existe pas de traitement efficace et nous proposons de tester les cellules souches mésenchymateuses (CSM) comme nouvelle méthode thérapeutique. Nos études antérieures sur la rectite radique ont démontré que les CSM permettent de reverser l'inflammation chronique et la fibrose après irradiation.

La thèse se divise en 2 parties. La modélisation préclinique de la CRC chez le rat est réalisée par une irradiation localisée guidée par imagerie de la vessie de 20 à 80 Gray et suivie de 3 à 14 mois post-irradiation. Des analyses d'expression de gènes et protéines ainsi que des paramètres histologiques et fonctionnels sont réalisés. La seconde partie de la thèse est le traitement de la CRC par les CSM.

L'analyse des paramètres urinaires a mis en évidence des hématuries augmentant avec le temps et la dose. L'analyse transcriptomique indique une inflammation chronique (IL1 $\beta$ , CCL2, IL6) et une hypoxie (HIF1 $\alpha$ ) et les observations histologiques révèlent une désorganisation de l'urothélium et de la fibrose à 6 mois à partir de 40Gy.

Ces premiers résultats attestent de la pertinence de l'étude en montrant une initiation de la CRC, avec une inflammation chronique, des signes d'hypoxie, des hématuries, une désorganisation de l'urothélium et de la fibrose à 6 mois pour une dose de 40Gy.

Le traitement sera réalisé pour une dose de 40Gy et suivi sur 12 mois. Les CSM issues du tissu adipeux seront injectés avant la phase chronique (4 mois post irradiation) à une dose de 5 millions de CSM par rat avec 3 injections séparées de 15 jours afin de potentialiser leur effet.



## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Mallia GEIGER  
 Date du début de la thèse : 04/11/2019  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SERAMED/LRMed  
 Tuteur de thèse : Alexandra SEMONT  
 Directeur de thèse : Fabien MILLIAT - IRSN  
 École doctorale : Sorbonne Université/Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique  
 Financement de thèse : IRSN

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

Ce travail nécessite l'établissement d'un protocole d'irradiation colorectale à doses fractionnées (proche de ceux utilisés en clinique). Deux doses seront sélectionnées, après analyse histologique du côlon, afin d'obtenir des lésions réversibles ou irréversibles. Dans ces modèles, il sera défini le temps auquel la dysbiose s'installe après irradiation. Des analyses de métagénomique et de métabolomique seront effectuées à partir de fèces et de muqueuse colique et permettront d'étudier la diversité microbienne et celle des métabolites produit par le microbiote intestinal. L'efficacité de la TMF associée ou pas aux CSM sera testée de façon préventive à l'apparition des lésions ou de façon curative. La fonctionnalité de la barrière épithéliale colique sera évaluée par des analyses histologiques ou de perméabilité épithéliale colique. Les mécanismes impliqués dans l'efficacité thérapeutique seront abordés *in vivo* mais aussi *in vitro* en utilisant des organoïdes de côlon.

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

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Lydia BENSEMMANE  
 Date du début de la thèse : 04/11/2019  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SERAMED/LRMed  
 Tuteur de thèse : Christine LINARD  
 Directrice de thèse : Christine LINARD – IRSN  
 Co-directeur de thèse : Xavier TRETON - Hôpital de Beaujon  
 École doctorale : Sorbonne Université/Physiologie, Physiopathologie, thérapeutique  
 Financement de thèse : IRSN

L'exposition aux rayonnements ionisants suite à un accident d'irradiation ou un acte de malveillance peut engendrer des conséquences graves sur la santé des personnes impactées. L'irradiation d'un large volume à des doses d'irradiation moyennes à fortes, induit des lésions irréversibles. Le syndrome gastro-intestinal (SGI) survient pour des doses supérieures à 6 Gy et se caractérise par l'apparition de nausées, vomissements, diarrhées, de douleurs abdominales parfois d'hémorragies digestives. D'un point de vue physiopathologique, le SGI est associé à une rupture de la barrière intestinale suite à un dommage sévère des cellules la constituant favorisant ainsi la pénétration au sein du tissu d'agents pathogènes. Souvent immunodéprimés, les patients souffrent d'une perte de fluide et d'électrolyte massives et développent une septicémie sévère entraînant la mort en une à deux semaines. A l'heure actuelle, ce syndrome engage rapidement le pronostic vital, sa prise en charge ne reste que symptomatique. L'utilisation de la thérapie cellulaire a montré un intérêt thérapeutique applicable au SGI. En effet le champ d'action des cellules souches mésenchymateuses (CSMs) s'étend de la régénération épithéliale, à l'immuno-modulation et la vasculogénèse. Cependant, le temps de culture nécessaire à l'amplification d'un nombre suffisant de cellules souches (21 jours) reste un obstacle à leur utilisation en cas d'accident d'irradiation. Ainsi ce projet s'intéresse à l'étude de l'impact de la *stromale vascular fraction* (SVF) obtenue à partir de la graisse sur la régénération de l'intestin, le but sera d'évaluer son efficacité thérapeutique sur le SGI. Cette étude répond à l'une des questions stratégiques de l'IRSN qui est « Quelles approches thérapeutiques innovantes proposer en réponse aux différentes pathologies associées aux fortes doses de rayonnements pour en améliorer la prise en charge ? ». La thèse se divisera en deux grandes parties, la première consistera à identifier les cellules cibles *In vivo* (immunohistochimie-étude de l'expression géniques) et *In vitro* sur un modèle d'organoïdes d'intestin du traitement par la SVF. La deuxième grande partie s'intéressera à évaluer le rôle et l'importance des cellules myélo-monocytaires de l'hôte dans l'efficacité thérapeutique de la SVF, *In vivo* (sur un modèle de souris dépletées en monocytes anti-inflammatoires (CX3CR1-/-) et pro-inflammatoires (CCR2-/-) et *In vitro* par des techniques d'immunohistochimie-expression génique permettra de mieux comprendre l'implication du système immunitaire de l'hôte (monocytes-macrophages) dans le traitement par la SVF. Ce projet de thèse répond aux besoins thérapeutiques appliqués au SGI et pouvant être appliqué à d'autres maladies inflammatoires chroniques intestinales.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Géraldine LANDON  
 Date du début de la thèse : 01/10/2019  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SESANE/LRSI  
 Tuteur de thèse : Guillaume PHAN/François FAY-Institut Galien Paris-Sud  
 Directeur de thèse : Elias FATTAL - CNRS  
 École doctorale : Université Paris-Saclay  
 Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué  
 Financement de thèse : IRSN

Lors d'un incident ou accident nucléaire impliquant des composés de cobalt ou strontium, les traitements actuellement préconisés sont les sels calciques de DTPA et du gluconate en cas de contamination interne par du cobalt et le chlorure d'ammonium et l'alginate de sodium en cas de contamination par du strontium. Bien que ces traitements existent, leur manque de spécificité et leur efficacité modeste nécessitent d'envisager des alternatives plus adaptées. L'amélioration de la prise en charge médicale des personnes exposées suite à un accident nucléaire ou radiologique ou à un acte de malveillance fait partie intégrante de la stratégie scientifique de l'IRSN. Ce projet de thèse qui s'inscrit parfaitement dans les défis de l'institut aura pour mission d'apporter des éléments concrets dans un secteur en demande.

Après une revue approfondie de la littérature scientifique, la piste de travail retenue consiste à identifier une molécule déjà utilisée dans une autre indication thérapeutique mais présentant une affinité potentielle vis-à-vis du cobalt et du strontium. La première phase de ce projet de recherche vise donc à sélectionner une ou deux molécule(s) d'intérêt(s) de la famille des biphosphonates, identifiées comme susceptibles de former des complexes stables avec le cobalt et le strontium puis de caractériser les complexes potentiels à l'aide de méthodes spectrales. Pour cela, une collaboration avec des équipes de chimistes spécialisées dans ce domaine a été établie. Au terme de cette étape, une mise en forme galénique de la ou les molécule(s) d'intérêt(s) dans des vecteurs de type liposomes sera réalisée et des expériences de caractérisation physico-chimique seront entreprises. Cette étape de développement pharmaceutique requerra le concours d'universitaires compétents pour la formulation de principes actifs et la caractérisation de formes pharmaceutiques innovantes telles que les vecteurs colloïdaux.

Le deuxième volet de la thèse sera consacré aux évaluations biologiques *in vivo* des molécules encapsulées comparées aux molécules libres, sur des modèles animaux (rongeurs), afin de vérifier l'hypothèse d'une amélioration de la décorporation des radionucléides par le ciblage dans leurs organes de rétention. Enfin, le troisième volet sera dédié à la finalisation des études *in vivo* en cours, à l'analyse des données, à leur valorisation sous forme de communications, ainsi qu'à la rédaction du manuscrit. Les résultats obtenus devront permettre de proposer une approche thérapeutique plus innovante et répondant de manière plus adaptée au besoin de prise en charge des personnes exposées.

# Radioprotection de l'Homme

## ➤ Radiotoxicologie

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

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

**Céline SERRANO** - Étude de l'apprentissage et de la mémoire spatiale à long terme après une exposition postnatale ciblée du cerveau ou du gyrus denté dorsal à des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants : rôle de la neurogenèse et du microenvironnement hippocampique.

## Sujet de la thèse :

Effets sur l'athérosclérose des faibles doses de rayonnements ionisants : études des mécanismes adaptatifs immuno-modulateurs

Doctorant : 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  
 Innovation thérapeutique du fondamental à l'appliqué  
 Financement de thèse : IRSN/EDF

Les études épidémiologiques mettent en évidence un lien entre l'exposition aux rayonnements ionisants (RI) à des doses modérées à fortes (>500mGy) et le développement de pathologies cardiovasculaires notamment les pathologies cérébrovasculaires, de la circulation et ischémiques. Cependant, les conséquences de ce type d'exposition à faible dose au niveau cardiovasculaire, notamment sur l'athérosclérose sont relativement peu documentées, d'où la nécessité de réaliser des études expérimentales.

Plusieurs travaux sur les RI à faible dose ont mis en évidence une baisse du profil inflammatoire à travers une diminution du taux de macrophages dans les plaques d'athérome (Le Gallic et al ; Ebrahimian et al ; Mancusso et al, 2015 ; Mitchel et al, 2011).

L'objectif de cette thèse, en lien avec les questions scientifiques prioritaires de l'IRSN, est d'étudier les mécanismes modulant le système immunitaire mis en jeu dans l'athérosclérose après exposition à faible dose. Ainsi, des études *in vivo* ont été menées après une irradiation à différentes doses et débits de dose, aux temps précoces et tardifs post-irradiation (PI) chez des souris ApoE<sup>-/-</sup> en vue d'étudier les voies monocytaires et lymphocytaires fortement impliquées dans l'athérosclérose.

Ces études ont mis en évidence :

- Une réponse différentielle des populations myéloïdes et lymphoïdes à une même dose de RI.
- L'existence d'un seuil d'apparition des effets pro-inflammatoires de la lignée lymphoïde à 500 mGy.
- Une diminution importante des lignées monocytaires pro-inflammatoire systémique sans effet seuil dans un contexte inflammatoire.
- 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.
- L'importance du débit de dose sur le système immunitaire dans le contexte de l'athérosclérose.

Ces résultats soulignent l'importance du microenvironnement et du débit de dose dans la réponse du système immunitaire aux faibles doses dans le contexte de l'athérosclérose. Plus particulièrement, les faibles doses contribuent à une réponse adaptative traduite par un stockage splénique de monocytes inflammatoires atténuant l'inflammation des plaques d'athérome.

Des travaux complémentaires concerneront :

- Temps précoce (J+1-J+10 PI) : caractérisation de la polarisation des monocytes et des macrophages et l'identification des mécanismes de régulation des monocytes.
- Temps tardif (J+100 PI) : l'objectif va être de comprendre si les modifications au niveau monocytaires observées aux temps précoces ont un impact mesurable au niveau phénotypique et fonctionnel dans l'athérosclérose à temps tardif.

## Références

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. Le Gallic, C., Y. Phalente, et al. (2015). "Chronic Internal Exposure to Low Dose 137 Cs Induces Positive Impact on the Stability of Atherosclerotic Plaques by Reducing Inflammation in ApoE<sup>-/-</sup> Mice." *PLoS one* 10(6): e0128539. Mancuso M, Pasquali E, Braga-Tanaka III I, Tanaka S, Pannicelli A, Giardullo P, et al. Acceleration of atherogenesis in ApoE<sup>-/-</sup> mice exposed to acute or low-dose-rate ionizing radiation. *Oncotarget*. 2015;6(31):31263. Mitchel R, Hasu M, Bugden M, Wyatt H, Little M, Gola A, et al. Low-dose radiation exposure and atherosclerosis in ApoE<sup>-/-</sup> mice. *Radiation research*. 2011;175(5):665-76.

## Sujet de la thèse :

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

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

Principale cause de contamination dans les installations nucléaires, l'impact des expositions à des aérosols particuliers soulève des enjeux sanitaires préoccupants. Le cerveau représenterait une cible directe notamment *via* l'implication de la voie d'entrée par le nerf olfactif. Le tungstène est considéré comme un contaminant émergent dans la littérature et les rapports d'autorités sanitaires. Cependant, il existe un manque de connaissances en matière de toxicologie sur le système nerveux central. Les situations d'exposition en lien avec les activités nucléaires concernent certaines opérations de démantèlement (découpe 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 (perte de vide).

Afin d'étudier les effets potentiels d'une exposition aux particules de tungstène, des travaux préalables de métrologie ont été réalisés pour maîtriser la génération de l'aérosol à des concentrations de l'ordre de la Valeur limite Moyenne d'Exposition professionnelle, et pour caractériser sa granulométrie. Cette étape a permis de développer un modèle d'exposition *in vivo* à un aérosol de tungstène ayant pour spécificité des particules de très grande masse volumique (19 300 kg.m<sup>-3</sup>). Il a notamment été observé un grand écart entre le diamètre aérodynamique médian et le diamètre de mobilité électrique.

Une première campagne d'exposition par inhalation, spécifique des voies aériennes supérieures, a été réalisée à deux concentrations différentes en mode aigu et répété sur 1 semaine. L'étude de processus impliqués en toxicologie cérébrale (neuroinflammation, stress oxydatif, mort cellulaire, neurogénèse) a été entreprise à plusieurs niveaux d'analyses biologiques. Les résultats obtenus sur les animaux sacrifiés 24 heures après exposition ont permis d'observer des modifications non linéaires de l'expression de gènes impliqués dans ces processus cibles, dépendantes du mode d'exposition et de la concentration. Conjointement, les expériences préliminaires d'immunohistochimie suggèrent un potentiel effet sur la morphologie des cellules microgliales impliquées dans la neuroinflammation. Cette première campagne d'exposition va permettre de concentrer les futures investigations avec l'objectif d'étudier plus en profondeur les mécanismes impliqués, notamment les liens entre les processus neuroinflammatoires et l'intégrité neuronale et la persistance des effets dans le temps après la fin des expositions.

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

## Sujet de la thèse :

**Étude de l'apprentissage et de la mémoire spatiale à long terme  
après une exposition postnatale ciblée du cerveau ou du gyrus denté dorsal à des doses  
faibles à modérées de rayonnements ionisants : rôle de la neurogenèse  
et du microenvironnement 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 - CNRS  
Directeur de thèse : Philippe LESTAEVEL - IRSN  
École doctorale : Université Paris-Saclay/Innovation thérapeutique  
du fondamental à l'appliqué  
Financement de thèse : IRSN

En pédiatrie, le scanner est une technique d'imagerie à visée de diagnostic médical couramment utilisée pour l'exploration de la tête. Son utilisation répétée peut aboutir à une dose cumulée de rayonnement ionisant relativement élevée dont les conséquences à long terme sont peu connues. Cependant, certaines études épidémiologiques suggèrent l'apparition de troubles cognitifs chez des adultes ayant été régulièrement exposés aux RIls durant l'enfance.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'impact des rayons X (doses  $\leq 2$  Gy) sur la mémoire spatiale à long-terme « hippocampe-dépendant ». L'une des bases cellulaires impliquée dans ce type de mémoire est la neurogenèse, création de nouveaux neurones, qui a lieu tout au long de la vie au sein du gyrus denté dorsal. Les objectifs de la thèse sont d'étudier : les effets tardifs induits par une exposition précoce aux rayons X sur l'apprentissage et la mémoire spatiale à long-terme, la relation dose-réponse et le processus de neurogenèse hippocampique. Pour cela, deux modèles d'irradiation ont été mis au point chez la souris âgée de 10 jours, à la plate-forme du SARRP (*Small Animal Radiation Research Platform*). Nous avons irradié (1) le cerveau entier ou (2) le gyrus denté dorsal, avec une dose unique de 0.25, 0.5, 1 ou 2Gy. L'apprentissage et la mémoire spatiale à long-terme ont été étudiés 3 mois après l'irradiation grâce au test de piscine de Morris.

Nos résultats démontrent que l'apprentissage n'est pas altéré par l'irradiation, quel que soit la dose testée. Une altération de la mémoire spatiale à long-terme a été démontrée uniquement dans le modèle d'irradiation localisée à 1Gy. Nos expériences ont permis de révéler une réponse différente aux rayons X entre nos deux modèles ainsi que la non-linéarité de la relation dose-réponse. Afin de mieux comprendre cette différence observée à la dose de 1Gy, nous avons étudié la neurogenèse hippocampique dans nos modèles par immunohistochimie. Les résultats démontrent que le processus de neurogenèse est modifié chez les animaux irradiés localement comparé à ceux dont le cerveau entier a été irradié. En parallèle, nous nous intéressons au microenvironnement hippocampique en étudiant le destin des cellules gliales, cellules nécessaires aux processus cognitifs.

Cette étude permet d'enrichir les connaissances scientifiques sur la sensibilité du cerveau en développement exposé à des doses faibles à modérées et participe à l'amélioration de la radioprotection chez l'enfant.

## Radioprotection de l'Homme

## ➤ Épidémiologie

Mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques

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

**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.

**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.

## La cohorte des travailleurs du cycle de l'uranium

**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 :

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

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

Depuis plusieurs décennies, les évolutions technologiques favorisent la multiplication des actes diagnostiques utilisant les rayonnements ionisants (RI). L'exposition médicale devient la seconde source d'exposition aux RI après l'exposition naturelle, représentant environ 20% de la dose totale. La dose délivrée au cours des examens scanner, comprise entre 5 et 50 mGy selon les organes exposés<sup>(1)</sup>, est nettement plus élevée que celle délivrée en radiologie conventionnelle. Les scanners ne représentent que 5% à 20% des procédures d'imagerie mais entre 40% et 70% de la dose médicale totale, selon les pays<sup>(2)</sup>. Environ 11% des scanners sont réalisés chez des enfants<sup>(3)</sup>. Ceux-ci représentent une population particulièrement sensible aux RI, étant donné leur radiosensibilité et leur longue espérance de vie avec pour conséquence potentielle un risque accru de cancer.

Dans ce contexte, le Laboratoire d'Epidémiologie des RI de l'IRSN a mis en place la cohorte « **Enfant Scanner** » en 2009. Il s'agit d'une étude multicentrique impliquant 21 CHU de France dont l'objectif est d'étudier le risque de cancer chez des patients exposés avant l'âge de 10 ans à un ou plusieurs examens scanner.

Une première analyse, réalisée sur un échantillon de 67 000 patients de la cohorte suivis jusqu'en 2014, a montré une augmentation de risque, non significative, de leucémie et de tumeur cérébrale associée à la dose cumulée. Cependant, le manque de puissance statistique pour la mise en évidence, si elle existe, d'une augmentation significative, limitait la portée des résultats. Désormais, le suivi est de 9 ans et 20 000 enfants supplémentaires vont pouvoir être inclus dans l'analyse.

Au cours de cette thèse, un premier travail consistera à mettre à jour la cohorte en termes d'incidence des cancers. Un croisement avec le Registre National des Cancers de l'Enfant (RNCE) permettra de recenser les cas de cancers incidents jusqu'à l'âge de 18 ans. Le croisement avec la Cohorte Cancer de l'INCa permettra le suivi à l'âge adulte. L'estimation des doses reçues dans les services de radiologie participants sera complétée à partir du Système National des Données de Santé (SNDS) pour prendre en compte les examens scanners réalisés en dehors des centres. Puis sera réalisée l'analyse de la relation dose-réponse entre le risque de cancer et la dose reçue par les enfants après exposition aux scanners. Enfin, nous évaluerons l'impact de la prise en compte des incertitudes dosimétriques ainsi que des facteurs de risques concurrents sur l'estimation de la relation dose-réponse.

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

(2) UNSCEAR. Annex A: Medical radiation exposures. United Nations, 2008.

(3) Mettler Jr, Fred A. *et al.* CT scanning: patterns of use and dose. *Journal of radiological Protection* 20.4, 2000.

## 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 : Marie-Odile BERNIER - IRSN  
 École doctorale : Université Paris Saclay/École Doctorale de Santé Publique  
 Financement de thèse : IRSN

En France, environ 6 500 à 8 000 enfants naissent chaque année avec une malformation cardiaque. L'utilisation des procédures de cardiologie interventionnelle en pédiatrie a permis des progrès incontestables dans la prise en charge de ces malformations. Cependant l'exposition des patients à des doses relativement élevées de rayonnements ionisants (RI) au cours de ces procédures demeure une question importante en radioprotection en raison des risques, notamment de cancers radio-induits associés aux RI à faible dose, de la plus grande sensibilité des enfants aux RI et de leur longue espérance de vie.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le risque de cancer associé à l'exposition aux RI lors des procédures de cardiologie interventionnelle réalisées au cours de l'enfance au sein de la cohorte **COCCINELLE**.

A ce jour, 17 995 enfants ayant bénéficié d'un acte de cathétérisme cardiaque avant l'âge de 16 ans entre 2000 et 2013 en France ont été inclus dans la cohorte et 23 997 cathétérismes ont été effectués soit 1,3 en moyenne par enfant. Près de 80% des enfants ont bénéficié d'une seule intervention. L'âge moyen à la première procédure et à la fin du suivi était respectivement de 4,3 et 13,8 ans. Les interventions ont été réalisées pour 37% avant l'âge de 1 an. Environ 40% des procédures étaient des procédures diagnostiques. Parmi les procédures thérapeutiques, les fermetures de canal artériel, les dilatations de valve pulmonaire, les fermetures de communication inter auriculaire et les dilatations aortiques étaient les plus fréquentes. Il a été mis en évidence 56 cas incidents de cancer, dont 20 lymphomes, 15 leucémies, 6 cancers du système nerveux central et 4 tumeurs rénales. L'âge moyen au diagnostic de cancer était de 7,9 ans et le délai moyen entre la première procédure et le diagnostic de cancer était de 3 ans.

Les résultats d'une précédente méta-analyse, objectif du premier axe de la thèse, ont montré que l'exposition pendant l'enfance à des doses faibles à modérées de RI (notamment la scannographie) peut conduire à un risque élevé de leucémie et de tumeurs cérébrales.

La comparaison de l'incidence des cancers dans notre cohorte par rapport à la population générale est en cours ainsi que la reconstitution des doses reçues. L'analyse de la relation dose-réponse, qui sera réalisée ensuite permettra de caractériser le niveau de risque réel associé à ces examens.

## 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  
 Directeur de thèse : Dominique LAURIER – IRSN  
 Co-directeur : Jean FERRIERES – INSERM  
 École doctorale : Université Paris-Saclay/École Doctorale de Santé Publique  
 Financement de thèse : IRSN - Projet européen MEDIRAD

La radiothérapie (RT), traitement adjuvant majeur du cancer du sein, est associée à un risque accru de pathologies cardiovasculaires au moins 5 à 10 ans post-RT. L'identification de signes précoces de cardiotoxicité et la mise en évidence de leurs liens avec la dose de rayonnements ionisants absorbée par le cœur pourraient favoriser la prédiction de la survenue de pathologies cardiovasculaires et améliorer la prévention chez les patientes à risque.

Cette thèse s'appuie sur la cohorte prospective monocentrique BACCARAT constituée de patientes traitées par RT du sein, sans chimiothérapie et suivies 24 mois post-RT. Une reconstitution individuelle des doses absorbées par le cœur, le ventricule gauche (VG) et les artères coronaires a été réalisée. Les signes précoces de cardiotoxicité sont définis par :

- La quantification des dysfonctions cardiaques infracliniques mesurées par échocardiographies (pré-RT, RT+6 et RT+24 mois) ;
- L'évaluation des modifications structurelles des plaques athéromateuses au niveau des artères coronaires évaluées à partir de coroscanners (pré-RT, RT+24) ;
- La mesure de l'évolution des concentrations d'un panel de biomarqueurs circulants potentiellement impliqués dans la cardiotoxicité (pré-RT, fin-RT, RT+6, RT+24).

Parmi les patientes incluses dans la cohorte, la dose moyenne au cœur était de 0,61 Gy chez les 19 patientes traitées pour un sein droit et de 2,91 Gy chez les 94 patientes traitées pour un sein gauche. Avec un suivi intermédiaire de 6 mois, l'analyse des données échocardiographiques a permis de montrer une dysfonction ventriculaire infraclinique caractérisée par une diminution >10% de l'indice de contractilité myocardique (longitudinal strain) chez près de 47% des patientes, en lien avec la dose moyenne absorbée par le VG (OR/1Gy = 1,14 ; IC95% = [1,02-1,29]). En fin de RT ou six mois post-RT, une altération de certaines cytokines inflammatoires (TNF-alpha, IL18) et certains marqueurs de dysfonctions ou activation endothéliales (thrombomoduline, fibrinogène) a pu être observée, mais un lien avec la dose cardiaque n'a été retrouvé que pour la thrombomoduline et le TNF-alpha. Enfin, pour la modélisation du risque de dysfonction ventriculaire infraclinique à 6 mois, l'ajout de la mesure de l'altération précoce en fin de RT du taux de fibrinogène à la dose au VG permettait une amélioration de la prédiction du risque (Log-likelihood sans fibrinogène = 86,70 ; avec fibrinogène = 77,65 ;  $p_{LRT} = 0,003$ ). Le recueil des données à 24 mois de suivi post-RT est en cours de finalisation et permettra de consolider et compléter les premiers résultats observés.

## 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/École doctorale de Santé Publique  
 Financement de thèse : IRSN/ORANO

Les effets sanitaires potentiellement induits par des expositions professionnelles multiples aux rayonnements ionisants et à des 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 cancérogène 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, 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.

On s'intéresse à l'estimation du risque de décès par cancer du poumon dans la cohorte des mineurs d'uranium français qui sont soumis simultanément à une exposition aux gaz radon, aux poussières d'uranium, aux rayonnements gamma mais aussi, entre autres, à une exposition au diesel (avec la mécanisation). Plusieurs modèles hiérarchiques bayésiens ont été ajustés pour tenir compte des erreurs de mesure sur l'exposition aux rayonnements gamma, des données d'exposition manquantes et sous seuil de détection dans l'estimation du risque associé à cette seule source d'exposition. 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 risque et un profil d'exposition proche et d'estimer le risque de décès par cancer du poumon associé au groupe.

Le travail sur l'exposition aux rayonnements gamma a permis de vérifier la robustesse des résultats ne tenant pas compte des sources d'incertitude, l'estimateur de risque n'ayant augmenté que de 4%. Le modèle de régression sur profils a été complexe à inférer. En effet, plusieurs outils indiquent que l'algorithme d'inférence n'a pas convergé sur les données de la cohorte. Cela est probablement dû à un manque de signal dans les données. Le modèle proposé a ainsi été simplifié afin de faciliter l'inférence et d'obtenir des estimations de risque associées à chaque groupe de mineurs. Un autre algorithme est néanmoins à implémenter afin d'améliorer l'inférence bayésienne du modèle complet. Enfin, le modèle doit être amélioré pour prendre en compte les erreurs de mesure et éventuellement l'évolution temporelle des expositions.

### ➤ Stockage géologique profond

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

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

**Robert CAULK** - Modelling the evolution of porosity distributions in compacted clay pellets during imbibition.

**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.

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

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

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

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

## Sujet de la thèse :

## Impact des panaches salin/alcalin sur le gonflement et l'auto-colmatage d'une roche argileuse endommagée

Doctorant :	Yara BARAKAT
Date du début de la thèse :	13/01/2020
Laboratoire :	PSE-ENV/SEDRE/LETIS
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	Yu Jun CUI – École de pont Paris Tech
École doctorale :	Université Paris-Est/Sciences, Ingénierie, Environnement
Financement de thèse :	IRSN/FANC

In France, the long term disposal of High Level or Intermediate Level and Long Lived (HL- or IL-LL) radioactive waste is considered at 500m depth, within a Callovo-Oxfordian (COx) claystone, chosen for its low hydraulic conductivity and high sorption capacity for most radionuclides. The disposal site Cigéo would be a multi-barrier system composed of the geological barrier (COx), the so-called Engineered Barrier (EB) and waste packages. For IL-LL waste, the EB would be made of a concrete structure, sealed by concrete support parts, embedding swelling clay (bentonite). The perturbation due to the excavation of disposal galleries, access shaft and ramps, is known to generate an Excavation Damaged Zone (EDZ) in the surrounding rock, which can act as preferential pathways for the migration of pollutants. Several studies have shown that the EDZ is able to recover its initial properties over time by self-sealing, owing to progressive re-saturation by underground water seepage. However, in the case of IL-LL waste, saline plume may seep from waste, particularly sulfate and nitrate ions (at up to 3M), and NaOH + KOH dissolved alkalis (at up to 0.5M in the pore water). In parallel, the massive concrete components used to support bentonite seals will release quantities of dissolved alkalis ions (NaOH, KOH). On the short term, when clays are partially water-saturated, self-sealing of the COx has been demonstrated under a circumneutral pH (7-8.5) of the pore water. However, highly saline and alkaline plumes may limit self-sealing of the COx and have a great impact on permeability allowing the contaminant to use preferential pathways. To our knowledge, this scenario has not been assessed yet.

The aim of this work is to determine the chemical, mechanical and hydro-dynamical perturbations caused by concentrated saline and alkaline plumes on i) self-sealing behavior, ii) permeability and iii) structure evolutions (pore and mineralogy) of the damaged geological barrier. To this end, laboratory sealing experiments will be carried out on cracked samples from Opalinus claystone's under relevant repository conditions. The fractured samples will be flown through with alkaline and saline plumes (or concrete pore water). The sealing behavior of the fractures will be detected by measuring deformation and fluid permeability. A dedicated set-up will be designed. Diffusion properties will be recorded after self-sealing. A complementary cell will be used to monitor pore structure changes during fluid flow (under X Ray micro-CT).

## Sujet de la thèse :

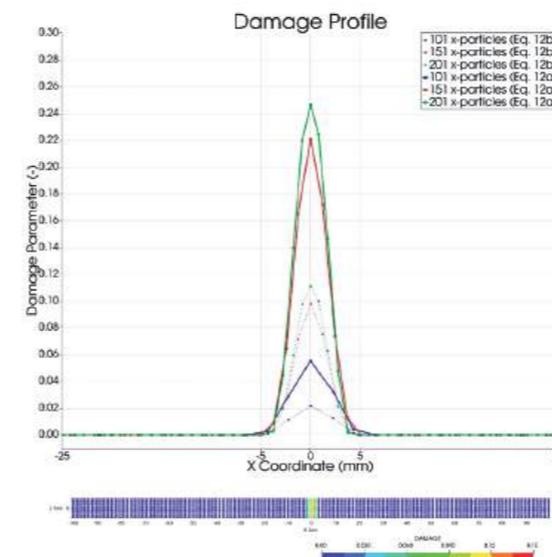
## Modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle des pores dans des milieux déformables à l'aide de méthodes particulaires (SPH)

Doctorant :	Rafael CHAVES DEPTULSKI
Date du début de la thèse :	02/10/2017
Laboratoire :	PSE-ENV/SEDRE/LETIS
Tuteur de thèse :	Magdalena DYMITROWSKA
Directeur de thèse :	Djimédo KONDO - UPMC
École doctorale :	Sorbonne Université/SMAER
Financement de thèse :	IRSN

Cette thèse vise à améliorer la compréhension des phénomènes de transfert de gaz dans le cadre de la sûreté d'un stockage géologique de déchets nucléaires localisé dans une couche d'argilite peu perméable et saturée en eau. Pendant la durée de vie d'une telle installation, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années, une importante production d'hydrogène est attendue à l'intérieur du stockage, principalement 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 de la roche hôte.

Dans l'état de l'art actuel, ce type d'écoulement diphasique est modélisé comme un écoulement visco-capillaire 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, créés localement par la dilatation de l'espace poral.

Afin de représenter ce couplage hydromécanique à l'échelle des pores, la thèse s'appuie 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, 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). Il permet également d'étudier les transformations morphologiques (fracturation) de la phase solide élastique par l'introduction de lois d'endommagement.



Afin d'optimiser la représentation de l'endommagement, le développement de code a été poursuivi afin d'introduire le modèle thermodynamique d'élasticité linéaire endommageable en trois dimensions. Il a été validé par des simulations dynamiques d'efforts mécaniques simples en traction (Figure) et en compression. La comparaison avec le modèle d'élasticité non-locale est en cours. Pour aller vers la modélisation de la dessiccation l'équation de diffusion Fickéenne a été discrétisée par la méthode SPH et implémentée.

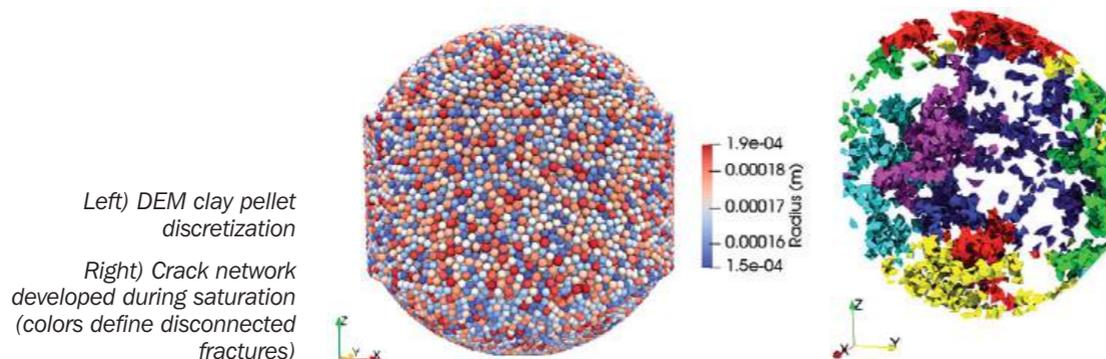
*Les profils d'endommagement le long d'une barre en traction pour différentes discrétisations et pour deux modèles d'endommagement montrant la différence entre les modèles et l'indépendance au maillage du solveur SPH.*

## Sujet de la thèse :

Modelling the evolution of porosity distributions  
in compacted clay pellets during imbibition

Doctorant :	Robert CAULK
Date du début de la thèse :	03/12/2018
Laboratoire :	PSE-ENV/SEDRE/LETIS
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	Bruno CHAREYRE - CNRS/UGA/G-INP
École doctorale :	Université de Grenoble/I-MEP2 3S-R
Financement de thèse :	IRSN/CCSN (Canada)

Vertical sealing systems for deep geological disposals are one of the key elements for long term containment, since they constitute the main potential pathway between nuclear wastes and the biosphere. One of the candidate materials for these vertical seals consists 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 ( $> 100\text{MPa}$ ). Since the behaviour of these highly compacted pellets during anisotropic imbibition contributes significantly to gas migration processes, the Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety (IRSN) initiated in-situ and laboratory experiments to understand the evolution of MX80 clay pellet structure during combined hydraulic-gas loading. X-ray microtomography and CT observations reveal the development of intricate crack patterns due to vapour transport and free swelling. The present work approaches the problem numerically in an effort to further elucidate the complex behaviour of the multi-scale clay pellet material during asymmetric hydraulic and gas loadings. In particular, a numerical framework is constructed based on the Discrete Element Method (DEM) coupled with the Finite Volume Method (FVM). The framework includes a hertzian contact law controlling the DEM structural mechanics, porosity dependent water retention curves for the partially saturated flow field, explicit models for the cracks and impermeable solids (minerals), and X-ray CT data imported for realistic porosity and crack assignments. The study applies the coupled model to the wetting of an MX80 clay pellet (Figure, left) from 132 Mpa suction to 9 MPa. Wetting initiates volumetric swelling which increases porosity, reduces suction forces, and results in the development of a crack network (Figure, right). The image based heterogeneous porosity distribution results in low porosity regions contracting while high porosity regions expand and desaturate. The wetting simulation is performed multiple times for various porosity distributions to yield a statistical estimate of the water permeability of a single pellet as a function of suction. This pellet scale permeability estimate will be used for laboratory scale simulations geared toward estimating permeability changes of pellet powder mixtures during anisotropic wetting.



## Sujet de la thèse :

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

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

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

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

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

## Sujet de la thèse :

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

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

Le concept de stockage des déchets radioactifs HA-MAVL en couche géologique profonde repose sur un système de multi-barrières de sûreté. Des matériaux nécessaires à la conception de ces barrières seront mis en place au sein du stockage, dont notamment une quantité importante de matériaux métalliques. Le but de ce travail est d'apporter de nouvelles données expérimentales sur la production d'hydrogène en conditions anoxiques lors des phénomènes de corrosion pure, de corrosion en présence de radiolyse et de corrosion post-irradiation, phénomènes qui se produiront après la fermeture du site de stockage. Dans ce contexte, un des enjeux de sûreté consiste à estimer les volumes de H<sub>2</sub> produits afin de mieux évaluer les risques liés à la présence de ce gaz (inflammabilité, surpressions) et de mieux dimensionner l'épaisseur des éléments métalliques utilisés.

Pour étudier cette problématique, les expériences consistent à placer sous rayonnement *gamma*, en conditions anoxiques, deux systèmes contenant de l'eau pure : dans le premier ont été immergés des échantillons métalliques et le deuxième sert de référence. La quantité d'hydrogène produite, mesurée en continu par chromatographie en phase gazeuse, nous renseigne sur les cinétiques des trois phases classiques de la corrosion. Par ailleurs, la surface des échantillons métalliques corrodés sous irradiation a été caractérisée par microscopie optique et électronique. De plus, l'identification des produits de corrosion formés est effectuée par spectroscopie et par une méthode d'absorption. Les caractéristiques chimiques de la solution (pH, Eh, [Fe<sup>2+</sup>], [Fe<sup>3+</sup>], [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]) ont également été déterminées.

Les premiers résultats sur la production d'hydrogène permettent de faire la distinction entre la contribution de la corrosion anoxique et celle des processus radiolytiques pendant la phase d'irradiation. L'analyse des produits de corrosion montre que la magnétite est l'oxyde principal formé en surface des échantillons métalliques. Cet oxyde semble se dissoudre dans la solution, conduisant à la libération d'ions Fer II et Fer III, susceptibles de changer les conditions physico-chimiques du milieu aqueux. De plus, les résultats expérimentaux montrent que la vitesse de corrosion après irradiation est supérieure de 22% en moyenne à la vitesse de corrosion anoxique pure. Pour se rapprocher des conditions représentatives d'un stockage géologique, des essais supplémentaires visant à étudier l'impact de la composition chimique de la solution et/ou de la température seront réalisés. Enfin, des travaux de modélisation sont effectués *via* le code Chemsimul pour interpréter les données relatives au phénomène de la radiolyse de l'eau pour les différentes conditions expérimentales testées.

## Sujet de la thèse :

## Modélisation chemo-mécanique du comportement des bétons soumis à des réactions sulfatiques interne et externe

Doctorant : Julie POUYA  
 Date du début de la thèse : 04/ 11/2019  
 Laboratoire : PSE-ENV/SEDRE/LETIS  
 Tuteurs de thèse : Mejdj NEJI/Frédéric PÉRALÈS  
 Directeur de thèse : Laurent De Windt – MINES ParisTech  
 École doctorale : GRNE - MINES ParisTech  
 Financement de thèse : IRSN

Dans le cadre de la conception d'une installation de stockage réversible des déchets radioactifs (projet Cigéo) et de l'extension de la durée d'exploitation des centrales nucléaires, l'IRSN a mis en place des travaux de recherche pour étudier la durabilité des matériaux cimentaires constituant d'une part, les colis contenant les radionucléides et d'autre part, l'enveloppe de confinement en béton armé des centrales nucléaires.

Ces matériaux peuvent subir des dégradations qui auront pour effet l'évolution de leur minéralogie et par conséquent, la modification de leur microstructure et des processus de diffusion au sein de la matrice cimentaire, impactant leurs propriétés de confinement. L'Institut s'intéresse particulièrement aux réactions sulfatiques internes (RSI) et externes (RSE), pathologies entraînant la précipitation de cristaux d'ettringite dans les pores du matériau, pouvant conduire à l'apparition de pressions de gonflement interne, altérant la durabilité du matériau cimentaire.

L'objectif de cette thèse est de mettre au point un outil de simulation numérique des dégradations chimiques et mécaniques endurées par les matériaux cimentaires. L'enjeu est de prendre en compte le couplage entre les réactions chimiques, les processus de diffusion et la réponse mécanique du système afin de développer un modèle permettant d'estimer le comportement du béton soumis à des réactions sulfatiques.

Le travail de thèse sera constitué de quatre étapes comprenant chacune une modélisation numérique d'un phénomène et les données expérimentales associées pour la validation du modèle. Les deux premières étapes s'intéresseront aux phénomènes de précipitation/dissolution dans une matrice cimentaire fissurée. Le colmatage du réseau de fissures fera l'objet d'une troisième étape où le volume des espèces chimiques ayant précipité sera comparé à l'ouverture de fissure pour en estimer l'impact sur le coefficient de diffusion du matériau. Une quatrième et dernière étape sera dédiée à l'évaluation des pressions de gonflement induites par la précipitation d'ettringite au sein des pores du matériau lors d'une attaque sulfatique externe.

Le logiciel XPER (IRSN), basé sur la théorie des éléments cohésifs pour décrire la fissuration, sera utilisé pour modéliser le transport réactif, l'évolution des propriétés mécaniques et la fissuration dans le matériau. Le logiciel CHESS (MINES ParisTech) sera couplé à XPER pour modéliser la thermodynamique (voire la cinétique) des réactions chimiques. La campagne expérimentale associée à la modélisation nécessitera l'emploi de cellules de dégradation chimique CHIMERES et des moyens expérimentaux de la plateforme ODOBA.

## Sujet de la thèse :

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

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

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) s'est vue confier la responsabilité, au travers du projet Cigéo, de concevoir un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs.

L'IRSN est en charge d'évaluer la sûreté du projet. L'un des axes d'expertise de ce dossier concerne le système de fermeture des galeries. Celui-ci est composé d'un noyau de bentonite bloqué entre deux massifs d'appui en béton bas-pH. De précédentes études ont montré un potentiel enrichissement de la matrice cimentaire en magnésium dû au contact avec l'eau porale des roches hôtes. Les analyses précédemment menées ont montré la formation de brucite et de silicate de magnésium hydraté (M-S-H) dans le matériau cimentaire.

Les mêmes phénomènes (précipitation de M-S-H et de brucite) ont été observés au niveau de barrages et de structures marines au contact d'eaux plus ou moins riches en magnésium.

L'objectif de la thèse est d'étudier l'influence de la précipitation des M-S-H sur le comportement chemo-mécanique des matériaux cimentaires. Pour cela, une caractérisation chimique des matériaux sera réalisée pour comprendre les mécanismes de précipitation des M-S-H, couplée à une caractérisation mécanique permettant d'appréhender l'impact de l'enrichissement en magnésium sur les changements structuraux et sur les propriétés mécaniques au sein de la matrice cimentaire.

L'étude multi-échelle se concentrera dans un premier temps sur des matériaux modèles puis s'étendra aux matériaux industriels au fur-et-à-mesure de l'acquisition de connaissances. Les matériaux modèles envisagés sont des pâtes de M-S-H synthétiques et des pâtes de C-S-H synthétiques. Les pâtes de M-S-H serviront à la caractérisation de l'hydrate seul tandis que les pâtes de C-S-H seront immergées dans du  $MgCl_2$  pour permettre d'étudier l'ensemble de la zone enrichie en magnésium. Les résultats obtenus permettront d'enrichir les modèles numériques existants qui seront également utilisés pendant la thèse (Hytec notamment).

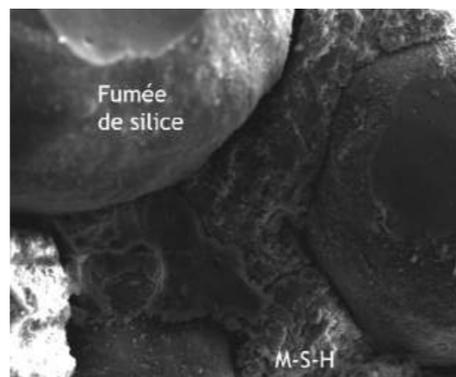


Image au Microscope électronique à balayage d'une pâte de M-S-H synthétique (Echantillon conservé à 50°C en atmosphère humide avec M/S=1 après 2,5 semaines d'hydratation)

## Sujet de la thèse :

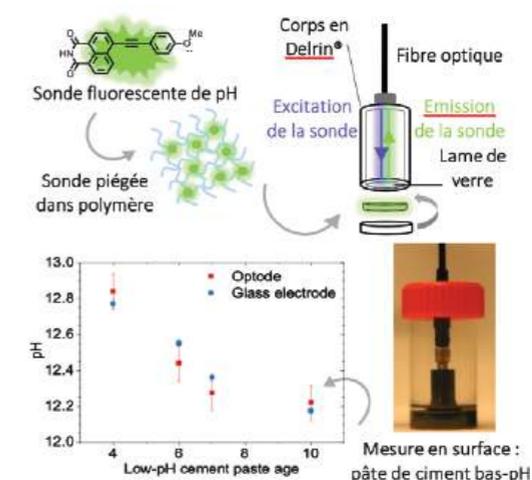
**Développement de capteurs à fibre optique dédiés à la mesure *in situ* du pH des bétons**

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

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

Dans ce contexte, les objectifs fixés sont de concevoir une optode de pH afin de suivre le vieillissement de matériaux cimentaires *in situ*, depuis la prise jusqu'à plusieurs mois/années. Cet outil permettrait de confronter les résultats expérimentaux nouvellement acquis aux modèles d'hydratation et de vieillissement préexistants. Afin de vérifier le domaine de validité des mesures par rapport à l'état de saturation en eau du matériau, l'optode sera testée en enceinte climatique au laboratoire LUTECE (FAR) dans des échantillons de matériaux cimentaires avec contrôle de l'humidité et de la température. L'objectif final est d'élaborer un démonstrateur opérationnel sur site réel au LRS de Tournemire, voir sur ODE. L'élaboration d'un polymère répondant aux variations de pH sera également testé pour injection dans la porosité de bétons issus d'ouvrages existants.

Une première optode a été élaborée et validée en solution pour une gamme de pH =10,5-13,5. Ainsi le pH en surface de pâtes de ciment bas-pH a été suivi au cours des 10 premiers jours d'hydratation (c.f. Figure). Afin de suivre le pH *in situ*, une deuxième optode plus résistante aux pH>13 est en cours d'élaboration.



## ➤ Risques environnementaux

### Transfert des radionucléides dans l'environnement en situation d'exposition chronique

**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.

**Adrien DELAVAL** - Modélisation des transferts de radionucléides dans un *continuum* fleuve-mer.

**Nathan BODEREAU** - Origine et spéciation du  $^{14}C$  dans les cours d'eau.

**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.

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

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

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

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

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

### Travaux référencés dans la démarche de recherche

« Dosimétrie et métrologie des rayonnements ionisants » : pages 15 et 16

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

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

## Sujet de la thèse :

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

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

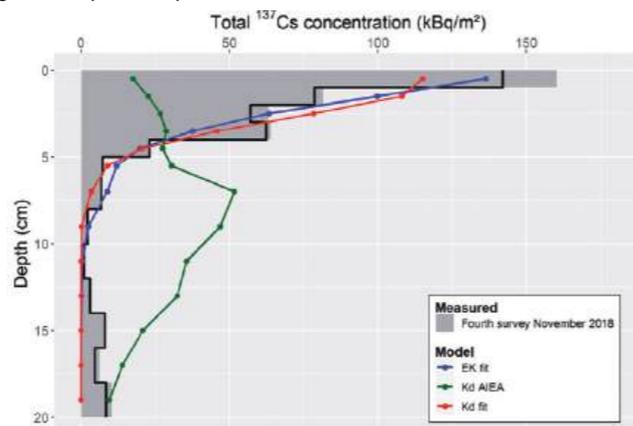
La sorption joue un rôle critique dans le transfert des radionucléides dans les sols. En évaluation, sa quantification repose sur le coefficient de partage (noté  $K_d$ ) dont les hypothèses (équilibre instantané entre les phases liquide et solide, linéarité et réversibilité des transferts), très simplificatrices, peuvent induire des erreurs dans l'estimation des temps de séjour des radionucléides dans une couche de sol définie. Le modèle EK propose une approche alternative supposant l'existence en quantités limitées de sites de sorption en équilibre avec la phase liquide et d'autres régis par des lois cinétiques.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la validité du modèle EK. La méthode de travail retenue a consisté à étudier la sorption du  $^{137}\text{Cs}$  dans des systèmes expérimentaux de complexité croissante : batch, réacteur, colonne, et sols contaminés issus de la région de Fukushima.

A cette dernière échelle, les paramètres des modèles EK/ $K_d$  ont été estimés par calage sur des profils de  $^{137}\text{Cs}$  mesurés *in situ*. Ces profils ont été mesurés à 4 endroits d'une parcelle forestière de la préfecture de Fukushima et à 4 dates différentes (entre 2013 et 2018). Les modèles de sorption ont été couplés à un modèle de convection dispersion afin de bien décrire le comportement hydrodynamique des profils de sols. Le terme source de la contamination du sol a été reconstruit à l'aide d'un modèle de transfert du  $^{137}\text{Cs}$  des horizons organiques vers le sol.

L'approche cinétique EK a mieux reproduit l'évolution temporelle de la distribution de la contamination dans les sols de 2013 à 2018. D'un point de vue graphique, les paramètres EK respectent mieux à la fois la persistance de la contamination en surface, et son transfert vertical (Figure). Le modèle  $K_d$  génère une migration plus rapide vers les couches inférieures car il suppose que toute la contamination reste disponible à l'écoulement.

Afin de bien mettre en évidence les différences entre les deux modèles, des simulations prédictives à long terme ont été effectuées à horizon 2030. Une validation des paramètres acquis *in situ* a été effectuée en les appliquant à d'autres profils issus de la littérature mesurés sur la même région étudiée.



Distribution verticale du  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{kBq/m}^2$ ) dans la parcelle 1 en 2018 et les résultats du calage des modèles EK (bleu) et  $K_d$  (rouge). La courbe verte représente le profil simulé avec la valeur  $K_d$  proposée par l'AIEA pour un sol organique

## Sujet de la thèse :

Modélisation des transferts de radionucléides dans un continuum fleuve-mer

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

Le Rhône constitue une source importante de radionucléides anthropiques à la Mer Méditerranée de par les installations nucléaires sur son linéaire et les retombées globales sur son bassin versant. La contamination de ces milieux est un risque permanent 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. Ces modèles sont simplifiés mais doivent induire le minimum d'erreur dans les approximations et 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 est réversible. A l'embouchure le milieu s'enrichit en cations (Na, K...) avec la salinité et 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 Rhône et son delta en mer Méditerranée.

## Objectifs :

- 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 le  $^{137}\text{Cs}$  dissous ;
- Considérer le mécanisme de désorption et les conditions aux limites côtières pour assurer la cohérence en termes de données entrée-sortie pour les deux modèles utilisés : sur le fleuve et en mer.

## Résultats:

- CASTEAUR reproduit correctement les débits sur le linéaire à l'exception des débits faibles ou l'influence des barrages se fait plus importante et n'est pas encore prise en compte ;
- Une review bibliographique exhaustive montre que la désorption du césium en eau saumâtre est rapide ( $\approx 1\text{h}$ ) et qu'une faible salinité ( $\approx 10$ ) est suffisante pour amorcer le processus ;
- Deux campagnes en mer pour observer ce processus ont eu lieu en juin et septembre 2019. Des expérimentations de laboratoire sont en cours pour préciser ce processus.

## Sujet de la thèse :

Origine et spéciation du  $^{14}\text{C}$  dans les cours d'eau

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

Le Carbone 14 est un isotope radioactif du carbone dont l'abondance est inférieure à 0,01%. Il présente des origines naturelles mais aussi anthropiques provenant notamment des rejets des installations nucléaires dans l'atmosphère et le milieu aquatique. Dans les hydrosystèmes, la compréhension du devenir du  $^{14}\text{C}$  rejeté par les industries nucléaires et de son transfert au sein des écosystèmes reste complexe. On retrouve en effet des teneurs en  $^{14}\text{C}$  plus élevées, que celles prédites par les modèles, dans des poissons, en aval de la Loire et du Rhône.

L'objectif de cette thèse est de définir les aspects fondamentaux de la spéciation du  $^{14}\text{C}$  dans les cours d'eau et de mieux évaluer les niveaux de marquage anthropique de l'environnement par les rejets chroniques ou accidentels des industries nucléaires.

Au sein des rivières, le  $^{14}\text{C}$  est distribué dans quatre compartiments : on distingue une phase dissoute et une phase particulaire utilisant les sédiments fins comme vecteurs de transport. Toutes deux sont composées d'une phase inorganique, caractérisée par la matière minérale, et d'une phase organique, représentée par la matière organique. Une multitude de mécanismes contrôle les échanges entre ces quatre compartiments. Une revue des connaissances sur le comportement environnemental du  $^{14}\text{C}$  est en cours de rédaction.

Le site d'étude, le bassin versant du Rhône, regroupe six sites nucléaires et présente des hétérogénéités géologiques et hydrologiques. Les travaux de recherche s'appuieront sur une acquisition, à haute fréquence, de données environnementales (Débit, Matières En Suspension, conductivité ou pigments chlorophylliens), à partir d'un préleveur automatique, à l'exutoire (station SORA). Des campagnes d'échantillonnages d'eau et de sédiments, à partir de Mars 2020, sur deux tributaires, viendront compléter ce jeu de données : l'Ardèche, un affluent cévenol, et la Durance, un affluent alpin riche en carbone organique fossile dépourvu en radiocarbone. Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  seront mesurées au sein des quatre phases étudiées ( $^{14}\text{CID}$ ,  $^{14}\text{COD}$ ,  $^{14}\text{CIP}$  et  $^{14}\text{COP}$ ).

Une approche mécaniste sera premièrement adoptée afin de qualifier les distributions et les modalités d'échange du  $^{14}\text{C}$  au sein des quatre phases. Une approche visant à estimer des flux Carbone 14, exportés par les sites nucléaires, et les contributions hydrochimiques des deux affluents sera ensuite réalisée à partir de relations entre des marqueurs environnementaux (Débit, Chlorophylle a...) et les quatre phases ( $^{14}\text{CID}$ ,  $^{14}\text{COD}$ ,  $^{14}\text{CIP}$  et  $^{14}\text{COP}$ ). Les analyses seront effectuées en collaboration avec le LSCE (Gif-sur-Yvette) et le LMC14 (Saclay).

## 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

Doctorant :	Amandine MOREREAU
Date du début de la thèse :	02/10/2017
Laboratoire :	PSE-ENV/SRTE/LRTA
Tuteur de thèse :	Hugo LEPAGE
Directeur de thèse :	Frédérique EYROLLE - IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Géosciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN

Les préoccupations environnementales ont conduit au début des années 1980 à la mise en place d'une surveillance de l'environnement sur les fleuves français nucléarisés. Pourtant, l'impact des activités nucléaires du siècle dernier est aujourd'hui mal connu. Les archives sédimentaires collectées dans les zones d'accumulation des fleuves permettent de reconstituer, à posteriori, les concentrations en radionucléides issus des activités anthropiques des dernières décennies lorsqu'elles n'étaient pas mesurées. La zone d'étude porte sur le Rhône et la Loire, les deux fleuves français les plus nucléarisés et présentant des dynamiques hydrosédimentaires très contrastées.

Une archive sédimentaire a été collectée en aval de l'ensemble des installations nucléaires de ces fleuves afin d'évaluer les concentrations et l'origine (naturelle/anthropique) des radionucléides et une archive « de référence » a été collectée en amont de toute influence de l'industrie nucléaire afin de connaître la contribution des apports par le drainage des bassins versants. Ces archives ont été datées puis analysées pour quantifier les radionucléides d'intérêt : émetteurs gamma, actinides, isotopes de l'uranium et tritium.

L'archive collectée à l'aval de la Loire a révélé des anomalies de plutonium issu de rejets industriels à la suite des accidents de la centrale de Saint Laurent des Eaux en 1969 et 1980. Le bassin versant a été marqué par les retombées atmosphériques des essais militaires des années 1960 avec un pic de  $^{137}\text{Cs}$  en 1963 et de tritium organiquement lié en 1973. De plus, des anomalies d' $^{236}\text{U}$  ont été simultanément observées sur cette période de temps.

Le Rhône aval a été fortement impacté par les rejets du centre de Marcoule, masquant le marquage du bassin versant par les retombées atmosphériques. Néanmoins une diminution rapide (divisée par 3 à 10 en moins d'un an) des concentrations en radionucléides provenant des rejets est amorcée depuis le début des années 1990 avec la nouvelle station de traitement des effluents liquides à Marcoule en 1990. En revanche, une contamination plus diffuse au tritium organiquement lié a été observée à l'amont et à l'aval du fleuve, présentant des concentrations supérieures aux valeurs mesurées dans les autres fleuves français également nucléarisés. Une dilution de ces concentrations est observée à l'aval avec des concentrations divisées par 10 par rapport aux valeurs mesurées à l'amont. Cette spécificité du Rhône résulte d'une contamination par l'amont au tritium technogénique issu d'ateliers d'horlogerie franco-suisse qui utilisaient des peintures tritiées en remplacement du  $^{226}\text{Ra}$  de 1960 aux années 2000 pour leur propriété radioluminescente.

Sujet de la thèse :

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

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

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 et mieux évaluer la sûreté des sites de stockage de déchets nucléaires de faible activité. 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 milliers d'années.

Cette thèse s'intéresse en particulier au site du Lac Nègre (Mercantour), dont les sédiments contiennent naturellement d'exceptionnelles teneurs en uranium. Suite à deux missions de prélèvements, des analyses chimiques, radiochimiques, microscopiques et diffractométriques ont été réalisées afin de caractériser précisément la composition chimique et minéralogique et l'âge des carottes de sédiments, des sols et des eaux échantillonnées. Dans un premier temps, il a fallu délimiter les sédiments non remobilisés par des tirs sismiques de prospection géophysique il y a 50 ans. Des mesures isotopiques fines (systèmes <sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U et <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) ont ensuite permis de mieux comprendre les processus d'accumulation et de transport de l'uranium dans le bassin versant jusque dans les sédiments. Enfin, la spectroscopie d'absorption des rayons X utilisant le rayonnement synchrotron nous renseigne sur l'état d'oxydation et la spéciation de l'uranium à l'échelle moléculaire dans la phase solide.

Les sédiments, riches en tests de diatomées siliceux et en matière organique, montrent une accumulation d'uranium croissante avec la profondeur de 350 à plus de 1000 µg/g, sous forme réduite essentiellement (U(IV)). Les analyses isotopiques montrent que la part d'uranium d'origine détritrique est très faible, et que l'essentiel de l'uranium semble être déposé sous forme de colloïdes exportés depuis la zone humide en amont du lac. Alors que l'uranium se dépose actuellement sous forme mononucléaire (non-cristalline), associé à des ligands C et Si, on observe en profondeur (après plus de 1 000 ans) l'apparition d'une structure locale de type nano-coffinite (USiO<sub>4</sub>). Cette observation semble confirmée par une augmentation de la fraction d'U(IV) cristallin non extractible au bicarbonate.

Ces résultats préliminaires suggèrent ainsi une recristallisation partielle des phases porteuses de l'uranium au cours de la diagenèse en conditions anoxiques. Ces recherches pourraient aider à guider le choix des conditions de stockage à long terme de sols ou sédiments contaminés en uranium, afin de favoriser au mieux la formation d'espèces peu solubles de l'uranium.

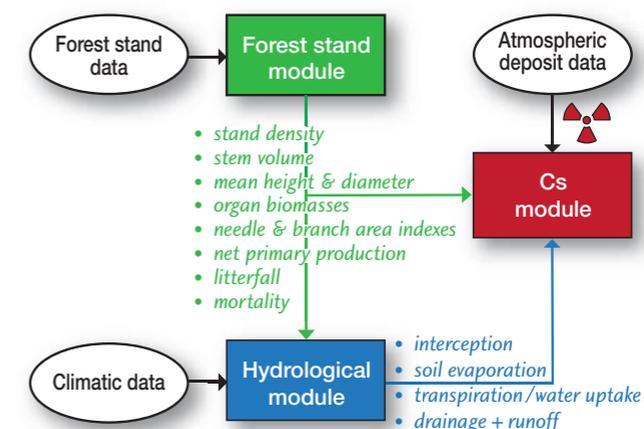
Sujet de la thèse :

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

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

A large number of radionuclides (RNs) were released in the atmosphere (nuclear tests, Chernobyl and Fukushima accidents) among which radiocaesium (<sup>137</sup>Cs) is the most abundant long-lived radionuclide with a 30 years period leading to its persistence in impacted media. The forest ecosystem is known as an important atmospheric pollutant sink due to its high interception efficiency and its capacity to recycle large amounts of chemical elements and RNs on the long-term. Over the last few years, the IRSN has been developing a process-based dynamic model, called TREE4 (Transfer of Radionuclides and External Exposure in FORest systems), for assessing the fate, transport and dosimetric impact of radiocaesium in forest systems. The approach has been tested and validated against measurements of <sup>137</sup>Cs obtained mainly in the Fukushima forests on the short and midterms. It relies on a quantitative assessment of RNs transfer processes, as well as some biomass and hydrological processes within the forest stand (see Figure below). Today, a major issue is that the TREE4 model requires an extrapolation to the French forest ecosystems to enable its application to the French territory. Another point is that the long-term processes which are still poorly understood require improved parametrizations in order to increase the model reliability on the long-term after a nuclear accident.

To address these issues, a preliminary task will be determining the distribution of <sup>137</sup>Cs (originating from nuclear weapon tests and Chernobyl accident) in a few forest stands selected from the RENECOFOR network (managed by the ONF). The field measurements will rely on soil, water and tree samples regularly collected from 1994 by the RENECOFOR and will be completed by a detailed sampling campaign in 2020. Another task will be to adapt the ecophysiological and hydrological modules to the studied forests based on RENECOFOR and literature data. After these 2 modules have been transposed, simulation of the <sup>137</sup>Cs transfer dynamics since the 1960s will be performed considering parameters and scenario uncertainties through probabilistic calculations. According to the obtained results, the necessary improvements in the radiological module will be implemented by better taking into account the influence of the explanatory factors and the biogeochemical cycle of stable analogues (K, <sup>133</sup>Cs) in the parameterization of the long-term transfer processes. A sensitivity analysis will conclude this work.



Structure of the TREE4 model (from Gonze et al., 2018)

## 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
Co-directeur de thèse :	Alkiviadis GOURGIOTIS – IRSN
École doctorale :	Sorbonne Université/Chimie physique et chimie analytique de Paris Centre
Financement de thèse :	IRSN

Au cours des dernières décennies, les activités humaines mettant en œuvre des matières radioactives (essais nucléaires, accidents nucléaires, mines d'uranium) ont libéré à la surface de la Terre de nombreux radionucléides naturels et artificiels. Bien que leur abondance soit extrêmement faible, leur persistance dans l'environnement peut conduire à des expositions chroniques de l'Homme et des écosystèmes, dont il convient d'évaluer les conséquences. Parmi ces radionucléides, le  $^{226}\text{Ra}$  (T=1600 ans) et le  $^{137}\text{Cs}$  (T=30 ans), dont les propriétés chimiques sont respectivement similaires à celles des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ , font partie des radionucléides les plus radiotoxiques. L'optimisation de la surveillance radiologique environnementale nécessite de mieux comprendre les processus responsables de leur transfert entre les zones d'émission et d'accumulation. Des techniques analytiques telles que la spectrométrie de masse et la spectrométrie gamma sont souvent utilisées pour la mesure de ces éléments. Cependant, l'analyse directe peut se heurter à certaines limites : interférences spectrales, effets de matrice ou limite de détection insuffisante. Une étape de traitement de l'échantillon en amont de l'analyse est alors nécessaire. Les protocoles existants font souvent appel à des résines échangeuses d'ions ne présentant pas une sélectivité totale pour ces éléments, avec des procédures d'extraction multi-étapes, chronophages et inadaptées à de petits volumes d'échantillons.

L'objectif de cette thèse est de synthétiser des supports hautement sélectifs basés sur la technologie de l'empreinte moléculaire (Ion-Imprinted Polymer (IIP)) pour l'extraction et la préconcentration du radium et du césium, présents à l'état de traces dans des échantillons environnementaux. L'IIP le plus prometteur sera miniaturisé, permettant l'analyse d'échantillons de l'ordre du  $\mu\text{L}$ , voire l'automatisation du processus analytique.

Jusqu'alors, huit IIP ont été synthétisés en utilisant des éléments non radioactifs comme ions empreintes (césium stable et baryum, comme analogue du radium) et en faisant varier la nature des monomères ou des solvants. Après optimisation de la procédure d'extraction, ces polymères ont montré des propriétés de rétention mais aucune sélectivité. Les conditions de synthèse n'étaient pas favorables à la formation des complexes ions empreintes/monomères, ne créant alors probablement aucune cavité spécifique.

Des études de complexation par conductimétrie et spectrométrie de masse sont en cours, afin de sélectionner la nature et la stœchiométrie du complexe conduisant à un futur IIP sélectif. Des étheroxydes acycliques ont été choisis comme monomères pour mimer le comportement sélectif des éthers couronne.

## Sujet de la thèse :

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

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

Afin de mieux comprendre la distribution et le transfert des radionucléides (RNs) dans l'environnement, l'IRSN mène des recherches dans le but d'améliorer les connaissances et les outils pour la gestion des sols contaminés. La modélisation prédictive de la distribution des RNs dans le système sol/solution est souvent basée sur l'utilisation d'un coefficient de partage (Kd) reliant la concentration totale du RN du sol à celle présente en solution. Bien que ce coefficient soit supposé à l'équilibre et fixe dans le temps plusieurs études montrent une stabilisation avec le temps des radionucléides dans la fraction solide (Cs, Mn, Co, Zn, Tc...). Cependant ces études restent parcellaires car chaque étude a été généralement réalisée pour un RN, un type de sol et une méthode d'extraction rendant leur extrapolation difficile. L'objectif de la thèse est donc d'étudier pour des sols de nature contrastés (sableux, organique, argileux, carbonaté) l'évolution dans le temps de la distribution solide/liquide de trois éléments ayant des comportements différents (Cs, I, U) pour deux formes de contaminations différentes (liquide et végétaux contaminés avec  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{233}\text{U}$  comme traceurs).

Les sols seront contaminés par le cocktail de RN apporté sous forme aqueuse, ou *via* des végétaux contaminés, et incubés *a minima* 1 an et demi dans des conditions d'humidité variables (cycles d'assèchement et d'humidification). Outre le suivi en continu de certains paramètres (température, humidité, production de  $\text{CO}_2$ ...), des prélèvements ponctuels permettront de suivre la distribution des RNs entre les phases solide et liquide (extractions successives) et la distribution au sein de la phase solide (extractions chimiques séquentielles). Pour expliciter les éventuelles variations observées l'évolution de la nature des microorganismes et des phases porteuses des sols sera également étudiée : qualité et quantité de matière organique (rapport carbone/azote, caractérisations spectrométriques), interactions matière organique/phases minérales (disponibilité et nature des sites d'adsorption)... Les résultats obtenus permettront de déterminer pour quelle(s) combinaison(s) RN/nature de contamination/sol il sera nécessaire de prendre en compte une modification dans le temps de la distribution solide/liquide des RNs. Suivant la cause de cette modification (i.e., modification du terme source, évolution des phases porteuses, changement de phase porteuse...) une modélisation alternative à l'approche Kd sera proposée.

Sujet de la thèse :

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

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

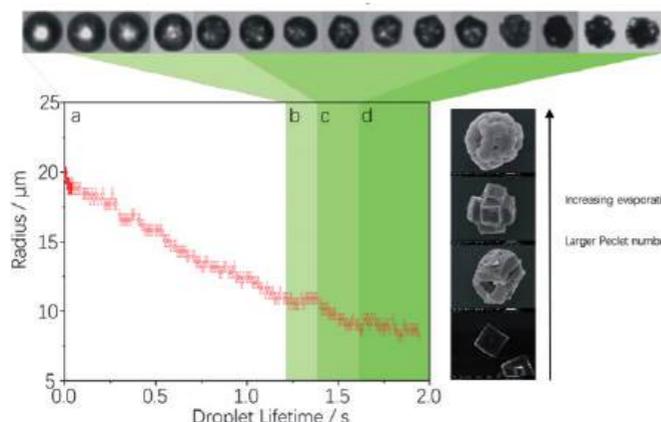
Environnement

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 and dry to form solid phase aerosol particles. Parameters governing droplet-drying impact the final dry particle morphology which in turn determines the aerodynamic and transport properties of the dry particles. One way to understand the effect of evaporation rate on final morphology is to use a Peclet number,  $Pe$ . It is essential for the IRSN to understand the transport properties of released particles in order to characterise the transfer of contamination and assess the efficacy of filtration methods.

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

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

An example dataset is shown in figure, demonstrating key measurement results. A qualitative relationship between  $Pe$  and morphology is shown too. During the work so far key developments have been made to overcome difficulties in the imaging of particles and the environmental control within the instrument. The FDC is now capable of precision measurements in predefined temperature and relative humidity with high reproducibility.



An example of evaporation profile for NaCl solution aerosol with an initial concentration of  $50\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  in a dry nitrogen environment at 296 K. The different stages of the drying process are marked by shading – initially a homogeneous droplet, followed by an inhomogeneous droplet stage, then a stage of a semi-crystalline particle and finally a dry crystalline particle. Example dry NaCl morphologies are shown on the right.

➤ Risques environnementaux

Transfert des radionucléides dans l'environnement en situation d'exposition accidentelle

**Hanaa HOUJEIJ** - Étude expérimentale des réactions de capture/désorption des iodes gazeux ( $\text{I}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ) sur des aérosols environnementaux.

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

**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.

**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.

## Sujet de la thèse :

Étude expérimentale des réactions de capture/désorption des iodes gazeux (I<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>I) sur des aérosols environnementaux

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

Iodomethane (CH<sub>3</sub>I) can be found inside the containment of a pressurized water reactor (PWR) following a severe nuclear accident as a gaseous product and further it can be transported into the atmosphere in the case of a containment leakage [1]. Once in the atmosphere, CH<sub>3</sub>I may interact with atmospheric species such as water droplets, ice particles or aerosols, which may influence their environmental and sanitary impacts. Investigating the interaction process between CH<sub>3</sub>I and water is the first step to better understand the molecular interaction of CH<sub>3</sub>I with species (i.e. water, hydrated aerosols and ice particles) found in both troposphere and stratosphere. In this context, we have studied the CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O processes by the matrix-isolation FTIR technique.

We have first investigated the CH<sub>3</sub>I behavior in matrix at 10 K. Gaseous CH<sub>3</sub>I (1000 ppm) diluted in Ar were deposited in a vacuum chamber on a NaCl at 10 K. In a second step, CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O processes were studied. Pre-mixed samples CH<sub>3</sub>I:H<sub>2</sub>O:Ar (1:2:1100 proportions) were deposited on NaCl window. Finally, CH<sub>3</sub>I has been deposited on amorphous ice at 25K.

The gas-isolated samples were measured with an FTIR spectrometer. To help in the identification of the formed species, the structure and vibrational spectra of (CH<sub>3</sub>I) monomer, dimer and trimer as well as CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O complexes were calculated using ωB97XD/aug-cc-pVTZ method.

The FTIR spectrum of CH<sub>3</sub>I/Ar in matrix showed peaks for CH<sub>3</sub>I monomer and dimer as described in the literature [2]. The FTIR spectrum of CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O mixtures showed peaks for, CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O and 2CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O complexes as the main species formed during the interaction process with water. Interestingly, the CH<sub>3</sub>I-ice interaction showed the formation of the same complexes (CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O and 2CH<sub>3</sub>I-H<sub>2</sub>O) which are fixed on the surface. Moreover, it has been shown that the complex formation on ice is stable as the spectra of CH<sub>3</sub>I/Ar deposition on ice is not affected by annealing.

Therefore, when gaseous CH<sub>3</sub>I is released in the atmosphere, complexes of water are formed that can play a significant role in the cycling life of Iodine. Further work with the irradiation of matrix containing xCH<sub>3</sub>I-yH<sub>2</sub>O complexes and amorphous or crystalline ice will be helpful to assess the influence of water on the photo dissociation of CH<sub>3</sub>I in the atmosphere.

## Références

- [1] Lebel, L. S.; Dickson, R. S.; Glowa, G. A. J. *Environ. Radioact.* 2016, 151, 82–93.  
 [2] Ito, F.; Nakanaga, T.; Futami, Y. *Chem. Phys. Lett.* 2001, 343, 185–191.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	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
Directeur de thèse :	Henri WORTHAM – Laboratoire Chimie Environnement
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN/Région PACA

Lors d'un accident survenant sur une installation nucléaire, des espèces iodées radio-toxiques, peuvent être relâchées dans l'atmosphère. Sous l'effet du rayonnement solaire, ces espèces sont décomposées et reformées en fonction des cycles jour-nuit, notamment via des processus d'oxydation qui sont modélisés dans les codes de calculs. Toutefois, la comparaison entre la simulation des conséquences de l'accident de Fukushima et les mesures de dépôts d'iode a mis en évidence une incohérence. Il est donc nécessaire d'améliorer ces simulations en prenant mieux en compte la modélisation de la réactivité physico-chimique de l'iode dans l'atmosphère dans les codes de dispersion atmosphérique comme CTM (*Chemistry Transport-Model*).

En effet, la décomposition des espèces spécifiques organo-oxygéné-iodées n'est aujourd'hui pas bien modélisée. L'étude cinétique de dégradation de ces composés par les radicaux HO° et O° a donc été réalisée avec un système VUV couplé à la résonance fluorescence, dispositif complexe et sensible d'utilisation. Différentes familles d'organo-oxygéné-iodées ont été sélectionnées: acide iodobenzoïque (C<sub>7</sub>H<sub>5</sub>IO<sub>2</sub>), acide iodoacétique (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>IO<sub>2</sub>), iodooxetane (C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>IO), iodoethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>IO) afin de déterminer leur constante cinétique de disparition dans différentes conditions expérimentales.

D'autre part, 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. Or, l'interaction de l'iode gazeux avec les aérosols environnementaux n'est pas bien connue et peut impacter significativement l'évaluation des conséquences radiologiques associées. Un protocole expérimental a été développé via les travaux de Socorro *et al.* (2015) et Zhang *et al.* (2010) afin d'étudier la cinétique de photo-dégradation de l'iode adsorbé sur des particules de silice sous l'effet du rayonnement solaire simulé par une lampe Xénon. La photoréactivité de l'iode a également été étudiée sous rayonnement solaire naturel afin de confirmer la similitude avec le rayonnement de la lampe Xénon. La durée de vie de l'iode adsorbé sur les particules modèles est considérablement plus longue que sa durée de vie en phase gazeuse où il est principalement décomposé par photolyse. Cette durée de vie accrue d'I<sub>2</sub> sur un milieu hétérogène pourrait avoir des conséquences directes sur son transport atmosphérique.

Ces données doivent ensuite être implémentées dans les codes de dispersion atmosphérique afin d'en évaluer l'influence, de mieux prédire l'évolution d'espèces iodées relâchées dans l'atmosphère et les conséquences radiologiques associées.

## 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

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

En cas d'accident nucléaire grave, de l'iode radioactif ( $^{131}\text{I}$ ) est rejeté dans l'environnement sous différentes formes physico-chimiques : particulaires et gazeuses. Une fraction de l'iode émis peut se déposer par temps sec (dépôt sec) ou par temps humide (dépôt humide) sur les différents couverts artificiels et naturels dont les végétaux. L'iode peut être retrouvé dans le lait de vache via le broutage de l'herbe et ensuite chez l'Homme et provoquer le cancer de la thyroïde. Concernant le dépôt sec de l'iode sur l'herbe, de nombreuses études ont montré que les vitesses de dépôt couvraient plusieurs ordres de grandeur, aucune paramétrisation n'ayant été établie. Pour comprendre ces incertitudes, sachant que l' $^{127}\text{I}$  et l' $^{129}\text{I}$  se comportent de la même manière que l' $^{131}\text{I}$ , plusieurs expériences basées sur des mesures d' $^{127}\text{I}$  et d' $^{129}\text{I}$  ont été réalisées. Les expériences réalisées sur l' $^{127}\text{I}$  ont consisté à émettre de l' $^{127}\text{I}$  sous forme élémentaire gazeuse dans l'atmosphère pendant une durée limitée en absence de précipitation et à quantifier l'iode déposé sur des éprouvettes d'herbe placées sous le vent du point d'émission. Les concentrations de l'iode dans l'atmosphère au-dessus des éprouvettes d'herbe étant mesurées, les vitesses de dépôt sec ont été déterminées et un modèle de dépôt sec de l'iode gazeux a été développé. Les vitesses de dépôt sec mesurées sont dispersées sur un ordre de grandeur et comparables aux vitesses de dépôt sec modélisées. Le modèle a montré que pour une même saison de l'année, les variations entre les vitesses de dépôt sont induites par les variations des vitesses de frottement du vent mesurées aux moments des expériences. Le modèle a également montré que les vitesses de dépôt évoluent au cours des différentes saisons de l'année. Elles sont plus élevées en été, qu'en automne. Le modèle développé dans cette étude a ensuite été couplé à un modèle de dépôt sec des particules existant au laboratoire afin de bâtir un modèle de dépôt sec de l'iode total (gaz et particule). Ce dernier a été validé sur la Plateforme Technique IRSN La Hague (PTILH) soumise aux rejets d' $^{129}\text{I}$  de l'usine Orano par comparaison avec des mesures. Pour cela, des prélèvements d' $^{129}\text{I}$  particulaire sur filtres et d' $^{129}\text{I}$  gazeux sur charbon actif ont été réalisés tous les 15 jours et des prélèvements d'herbe tous les mois. Ces prélèvements ont été mesurés par spectrométrie gamma pour déterminer les concentrations d' $^{129}\text{I}$  dans les différentes matrices prélevées.

## 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 : 01/02/2018  
 Laboratoire : PSE-SANTE/SESUC/BMCA  
 Tuteur de thèse : Olivier SAUNIER  
 Directeur de thèse : Marc BOCQUET - CERECA  
 École doctorale : Université Paris-Est/Sciences, Ingénierie et Environnement  
 Financement de thèse : IRSN

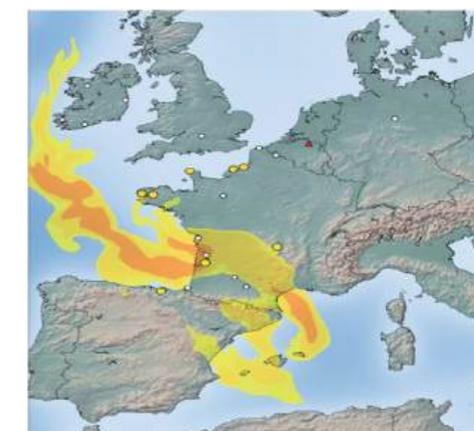
En cas de rejet atmosphérique accidentel, la dispersion des radionucléides, leur dépôt dans l'environnement et les mesures de radioactivité, sont des éléments essentiels pour évaluer les conséquences environnementales et sanitaires et ainsi émettre des recommandations appropriées vers les autorités. La qualité des résultats obtenus à partir d'un modèle de dispersion dépend des champs météorologiques et du terme source. Le terme source inclut la localisation, l'évolution temporelle des débits de rejet des radionucléides et leur forme physico-chimique.

Les méthodes de modélisation inverse qui consistent à combiner les modèles de dispersion avec les mesures dans l'environnement ont prouvé leur efficacité dans l'évaluation du terme source.

Les travaux de thèse visent à améliorer les méthodes de modélisation inverse de type déterministe déjà utilisées à l'IRSN. L'objectif est de développer et de mettre en œuvre des méthodes de type bayésienne (probabiliste) afin d'échantillonner efficacement les distributions des variables décrivant le terme source. Ces algorithmes permettent en effet d'obtenir une caractérisation complète du terme source ainsi qu'une quantification des incertitudes associées aux erreurs d'observation et de modélisation.

Deux types de méthodes d'échantillonnage sont considérés au cours de cette thèse : des méthodes de Monte Carlo par Chaînes de Markov (MCMC) et une méthode de descente de gradient basé sur l'identité de Stein. Des approches bayésiennes visant à quantifier rigoureusement les incertitudes sont mises en œuvre en se basant sur la définition de la vraisemblance, la réduction du nombre d'observations, et la perturbation de paramètres météorologiques et du modèle de dispersion.

Ces méthodes sont appliquées à deux cas d'études : la détection de Ruthénium d'origine inconnue en Europe à l'automne 2017 et le rejet accidentel de Sélénium en mai 2019. Les distributions des variables relatives à la source et les erreurs d'observation sont reconstruites à partir de l'approche bayésienne. La pertinence de ces méthodes d'échantillonnage a été étudiée et les résultats sont cohérents avec ceux obtenus par les méthodes inverses déterministes. De plus, le temps de calcul requis par les méthodes bayésiennes est compatible avec une utilisation opérationnelle.



Dispersion du nuage de Sélénium lors du rejet accidentel à Mol en mai 2019

### ➤ Risques environnementaux

#### Améliorer l'évaluation du risque radiologique aux écosystèmes

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

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

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

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

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

**Clément CAR** - Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants.

**Audrey SOULOUMIAC** - Étude mécaniste et écophysiologique du transfert du carbone 14 chez la Carpe commune (*Cyprinus carpio*).

## Sujet de la thèse :

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

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

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

Ma thèse a pour objectif d'acquérir des connaissances mécanistiques sur les effets des RI sur le cerveau adulte en utilisant le poisson zèbre, un organisme modèle en écotoxicologie. Il a la particularité de posséder une neurogénèse adulte abondante, ce qui permet des analyses sur les cellules souches neurales adultes. De nos jours, l'évaluation du risque écologique nécessite la production de données sur différentes échelles biologiques de l'organisme. Ainsi, nous souhaitons mettre en relation des effets moléculaires, la prolifération et la différenciation cellulaires et la neurotransmission avec des paramètres individuels intégrateurs comme l'anxiété et le comportement social, proposés récemment comme plus précoces et sensibles au stress génotoxique que la survie, la croissance ou la fertilité.

Nous avons exposé des poissons zèbre adultes (6-8 mois) à des débits de doses de 50 µGy/h, 0,5 mGy/h et 5 mGy/h durant 36 jours dans l'installation MICADO-LAB. Ces expositions sont proches des recommandations pour la protection des écosystèmes (10µGy/h) et du domaine des faibles débits de doses à 6 mGy/h (UNSCEAR). Après dissection du télencéphale (partie la plus antérieure du cerveau), des analyses globales du transcriptome sur ces tissus montrent des dérégulations de gènes nécessaires à la neurotransmission (sérotonine, dopamine), la neurogénèse adulte (atf3 et insm1a) et le système neuroendocrinien (en particulier l'ocytocine) impliqué dans la régulation de la réponse au stress et le comportement social. Des analyses d'immunocytochimie sur coupe histologique de cerveaux adultes confirment certains des résultats et suggèrent fortement que les irradiations chroniques à des doses modérées à faibles de RI peuvent altérer les fonctions cérébrales chez l'adulte. Deux tests comportementaux sont actuellement développés afin d'évaluer si ces perturbations neurologiques sont prédictives de changement au niveau des phénotypes individuels.

## Sujet de la thèse :

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

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

Mieux comprendre les effets biologiques radioinduits chez les différentes espèces constitue un enjeu majeur de l'évaluation du risque radioécologique. Cependant, peu d'études s'intéressent aux effets induits sur le long terme par une exposition chronique aux rayonnements ionisants (RI). Chez de nombreux invertébrés, dont *Caenorhabditis elegans*, la reproduction, paramètre important pour le maintien d'une population, est le paramètre le plus radiosensible. Une exposition chronique aux RI de ce ver, espèce modèle hermaphrodite des sols, au cours de son développement complet, a montré une diminution de la reproduction au niveau individuel (taille de ponte), cellulaire (nombre de spermatozoïdes) et moléculaire (dérégulation de protéines et gènes impliqués dans la reproduction et le métabolisme des lipides).

Afin d'établir les liens de causalité entre ces différentes échelles, cette thèse vise à décrire plus précisément les mécanismes responsables des effets individuels chez *C. elegans*, en particulier au niveau du métabolisme lipidique, étroitement lié à la reproduction, et de la voie de régulation Ras/ERK (MPK-1 chez *C.elegans*), contrôlant de nombreux processus physiologiques dans la gonade (apoptose, transition mitose/méiose, transition spermatogenèse/ovogenèse). Pour identifier le stade de développement critique, les effets individuels et cellulaires (taille de ponte, cinétique de ponte, nombre de spermatozoïdes) ont été étudiés après irradiation de l'embryogenèse, gonadogenèse et gamétogenèse. A l'échelle moléculaire, les lipides ainsi que les acides gras ont été quantifiés sur les organismes entiers (HPTLC et GCMS/FID, respectivement) de même que l'expression de MPK-1 dans la gonade, par microscopie confocale après immunomarquage.

Les résultats semblent montrer qu'après irradiation, la reproduction et le métabolisme des lipides sont impactés dès l'embryogenèse. Ainsi, les voies de régulation communes sont à investiguer. En revanche, la voie de régulation de MPK-1 n'est activée qu'à partir de la gonadogenèse, et jusqu'à la fin de la gamétogenèse (zone d'apoptose particulièrement), suggérant un effet à deux niveaux : développement de la gonade et des gamètes. Enfin, les spermatozoïdes ne semblent diminuer qu'après irradiation jusqu'à la fin de la gamétogenèse, suggérant des dommages directs sur les gamètes formés. Les effets sur leur structure et fonctionnalité seront donc recherchés par microscopie électronique.

Les résultats obtenus mettent en évidence que tous les effets étudiés n'apparaissent pas au même stade et que les effets sur le développement complet pourraient être une résultante de l'ensemble. Mieux décrire la complexité de ces interactions permettra de prédire les effets à l'échelle populationnelle, et ainsi contribuer à améliorer l'évaluation du risque environnemental.

## Sujet de la thèse :

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

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

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

Deux études à forte dose (50 mGy h<sup>-1</sup>) ont été réalisées afin d'observer des effets sur la reproduction, en irradiant des adultes puis leur descendance. Le succès reproducteur des adultes (F0) était de 100% pour les conditions témoins et irradiés. Cependant les F1 irradiés et recovery n'étaient pas viables après 120 heures post fertilisation (hpf), avec 100% de mortalité. Plusieurs hypothèses sont à prendre en compte pour expliquer les effets observés sur la descendance :

- (1) transmission d'effets épigénétiques (méthylation de l'ADN) ;
- (2) altération de l'ADN des gamètes (génotoxicité) ;
- (3) mauvaise constitution des réserves (défaut de protéolyse de la vitellogénine) ;
- (4) concentration en cortisol maternelle trop élevée et transmise à la descendance. Ces marqueurs restent à analyser. En parallèle de ces analyses, une 3<sup>ème</sup> expérimentation est actuellement en cours. Il s'agit d'une étude multigénérationnelle (2 générations exposées) réalisée à faible dose (0.05 et 5 mGy h<sup>-1</sup>) dans l'installation MICADO'LAB. Les capacités de reproduction des F0, exposés pendant 30 jours n'ont pas été altérées. Les résultats de mortalité des F1 ne présentent pas d'effet aussi drastique que pour les expérimentations à 50 mGy.h<sup>-1</sup>.

L'objectif étant d'observer les effets transmis de l'adulte à la descendance, les analyses seront poursuivies à l'échelle individuelle en suivant pour chaque génération la ponte associée à chaque couple. Afin d'observer les effets mécanistiques, des résultats moléculaires sont attendus avec notamment le séquençage de l'épigénome et des quantifications de vitellogénine et cortisol. Les générations de la dernière descendance F3 aura lieu en juillet 2020. Ainsi, la fin de deuxième année et la dernière année de thèse pourront être entièrement consacrées à l'analyse des échantillons collectés.

## Sujet de la thèse :

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

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

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

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier expérimentalement les réponses évolutives de populations d'un animal modèle de laboratoire, le nématode *Caenorhabditis elegans*, exposées à des rayonnements ionisants *gamma*.

Pour atteindre cet objectif, des populations de *C. elegans* ont été exposées pendant environ 20 générations à trois débits de dose (0 - 1,4 et 50 mGy.h<sup>-1</sup>). Plusieurs traits d'histoire de vie ont été mesurés à chaque génération : la taille de la population, la fréquence des mâles, le succès d'éclosion et la taille de ponte. A l'issue de cette exposition, de nouvelles expériences ont été réalisées pour déterminer si les modifications des traits observés étaient dues à une adaptation génétique des populations (l'analyse des données est en cours).

Les premiers résultats montrent qu'après 20 générations, la taille des populations irradiées augmente significativement de 7% à 1,4 mGy.h<sup>-1</sup> et diminue de 5% à 50 mGy.h<sup>-1</sup> par rapport aux populations contrôles. Par contre, une augmentation significative de la fréquence des mâles de 11% et 17% a été mesurée respectivement pour des débits de dose de 1,4 et 50 mGy.h<sup>-1</sup>. Enfin, une diminution significative de 8% du succès d'éclosion et de la taille de ponte précoce a été observée au débit de dose le plus élevé.

La modification du sex-ratio pourrait s'expliquer par une augmentation des anomalies sur le chromosome sexuel. La diminution du succès d'éclosion pourrait être due à un effet négatif des rayonnements ionisants sur l'embryogénèse. Et une atteinte de l'embryogénèse et/ou de la gamétogénèse pourrait expliquer la diminution de la taille de ponte précoce. Ces deux paramètres expliqueraient la diminution de la taille des populations irradiées.

Par ailleurs, les génomes entiers des populations seront séquencés au fil des générations, ce qui permettra 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.

## Sujet de la thèse :

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

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

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

Les mécanismes spécifiques d'action des rayonnements beta sur les organismes sont relativement peu connus. Ces questionnements s'intègrent dans la stratégie scientifique de l'IRSN et visent à mieux caractériser les effets d'une exposition aux faibles doses sur l'environnement. L'ensemble des travaux déjà réalisés au laboratoire LECO sur les stades larvaires du poisson zèbre, *Danio rerio*, ont permis de révéler des différences de mécanismes d'action pour les rayonnements beta émis par le tritium en fonction de la forme considérée (thymidine tritiée ou HTO). Dans la continuité de ces travaux, cette thèse propose de caractériser les effets, la répartition subcellulaire et la dose générée par le tritium administré sous forme organique sur le poisson zèbre aux stades larvaires et adultes. Ce travail combinera des démarches expérimentales et des simulations dosimétriques et microdosimétriques pour (a) caractériser la dose générée par le tritium en fonction de sa répartition subcellulaire à l'échelle d'un organe, (b) lier la dose aux effets observés chez les larves exposées et sur la reproduction chez l'adulte et (c) lier la dose aux effets observés sur les larves issues de parents contaminés.

Dans un premier temps, des larves de poisson zèbre seront exposées à du tritium sous forme organique (thymidine tritiée) à des débits de dose allant de 0,4 à 4  $\mu\text{Gy/h}$ . Les effets aux niveaux développementaux, génétiques, immunologiques musculaires et comportementaux seront étudiés. Dans une seconde partie, les poissons adultes seront exposés à ces mêmes débits de dose et les mêmes types d'effets seront étudiés. Lors de ces approches expérimentales, les doses générées à l'échelle appropriée seront évaluées par des simulations numériques et reliées aux effets observés.

## Sujet de la thèse :

Réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage à une exposition chronique aux rayonnements ionisants

Doctorant : Clément CAR  
 Date du début de la thèse : 01/10/2019  
 Laboratoire : PSE-ENV/SRTE/LECO  
 Tuteur de thèse : Jean-Marc BONZOM  
 Directeur de thèse : André GILLES - Aix-Marseille Université  
 École doctorale : Aix-Marseille Université/Sciences de l'environnement  
 Financement de thèse : IRSN

Suite à une radiocontamination de l'environnement comme après l'accident de Tchernobyl, il existe de nombreuses inconnues et controverses sur les conséquences d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants (RI) sur la faune sauvage. Parmi les quelques études menées à l'échelle des populations, rares sont celles prenant en compte le tissu d'interactions dans lequel se trouve l'organisme considéré (écologie), ainsi que l'histoire dans laquelle s'inscrit cet organisme (évolution). Or, ces éléments apparaissent essentiels pour comprendre l'état des populations. Ce projet de doctorat a ainsi pour objectif d'accroître notre compréhension des réponses écologiques et évolutives de la faune sauvage habitant des environnements radiocontaminés, souvent exempts de toute activité humaine. Par une approche de génétique des populations réalisée sur un amphibien, la rainette verte (*Hyla orientalis*), une première étude nous a permis de montrer l'existence d'une diversité génétique mitochondriale anormalement élevée dans la zone d'exclusion de Tchernobyl plus de 30 ans après l'accident nucléaire, ainsi qu'une évolution mitochondriale très particulière en comparaison à l'histoire évolutive des populations d'*H. orientalis* européennes. Nous concluons à l'existence de mutations sur l'ADN mitochondrial très fréquentes depuis l'accident. Des questions restent cependant encore à élucider concernant la spécificité de la réponse de la rainette et la généralisation à d'autres situations (Fukushima...) du rôle évolutif des RI.

Si l'on observe que l'espèce *H. orientalis* se maintient à Tchernobyl, nous montrons que l'effectif des populations est très faible. Notre hypothèse principale pour expliquer ces faibles effectifs est un effet de mutations délétères non conservées mais nécessairement associées aux mutations observées (neutres, bénéfiques). La stratégie démographique (taille des pontes, temps de génération, ...) des rainettes les rend potentiellement moins sensibles à cette pression de mutations que d'autres espèces. Pour mieux comprendre comment cette pression peut affecter différemment les espèces, il est prévu d'étudier la génétique des populations d'autres espèces possédant des caractéristiques démographiques différentes de celles de la rainette. De plus, nos premiers travaux sur *H. orientalis* ne nous permettent pas de généraliser l'effet des RI issus d'une radiocontamination de l'environnement à partir de la seule situation de Tchernobyl. Pour mieux comprendre l'impact des RI sur l'évolution de la faune sauvage, et l'importance de la dimension temporelle, nous comparerons la microévolution des populations de rainettes de la région de Tchernobyl à celles de Fukushima (*H. japonica*). Pour cela nous analyserons des échantillons biologiques d'*H. japonica* récoltés 1, 2 (conservés dans nos congélateurs) et 10 (mission de terrain prévue en 2021) ans après l'accident.

## Sujet de la thèse :

Étude mécaniste et écophysiological du transfert du carbone 14 chez la Carpe commune  
(*Cyprinus carpio*)

Doctorant : Audrey SOULOUMIAC  
Date du début de la thèse : 02/10/2017  
Laboratoire : PSE-ENV/SRTE/LECO  
Directeur de thèse : Frédéric ALONZO – IRSN  
Co-directeur : Jean-Christophe POGGIALE -MIO  
École doctorale : Aix-Marseille Université/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. Ces deux radionucléides contribuent majoritairement à la dose (de l'ordre de 0.01 mSv/an) reçue par la population locale essentiellement par ingestion de poissons contaminés. Les modèles actuels de transfert du  $^{14}\text{C}$  en milieu aquatique restent simplistes et ne prennent pas en considération les variations de biodisponibilité du  $^{14}\text{C}$  intervenant au fil de la chaîne trophique ni les nombreux processus clés du métabolisme (assimilation, respiration, incorporation...). L'objectif de la thèse est de produire des prédictions physiologiquement et écologiquement robustes à travers l'application de la théorie du Budget Énergétique Dynamique (DEB). Ce modèle individu-centré décrit la façon dont un organisme acquiert et utilise l'énergie qu'il ingère pour ses fonctions métaboliques (croissance, reproduction...) en fonction de la disponibilité de la nourriture et de la température. Ce modèle permettra de décrire le transfert du  $^{14}\text{C}$  et d'étudier le flux des isotopes du carbone chez les poissons.

Afin de répondre à cette problématique, le modèle DEB de *Cyprinus carpio* a été complété pour améliorer les prédictions de croissance et de masse. Le modèle DIB ("*Dynamic Isotope Budget*"), extension du modèle DEB appliqué en écologie fondamentale à l'analyse des isotopes stables ( $^{13}\text{C}$  et  $^{15}\text{N}$ ), nécessite d'être adapté au cas du  $^{14}\text{C}$  via l'acquisition de données expérimentales. Le but de ces expérimentations est d'obtenir des cinétiques d'ingestion, de défécation, d'assimilation, d'incorporation et de respiration du  $^{14}\text{C}$  chez les carpes.

Des carpes juvéniles ont été nourries de 1 à 4 jours avec de la nourriture contaminée au  $^{14}\text{C}$  afin de suivre ces cinétiques à partir des activités mesurées dans l'eau, les fécès, la fraction musculaire et l'organisme entier. Par ailleurs, des carpes ont été nourries pendant 5 jours avec de la nourriture contaminée puis mises à jeûner de 2 à 4 jours pour établir des cinétiques d'élimination du  $^{14}\text{C}$  dans les tissus. L'activité du  $^{14}\text{C}$  a été mesurée par scintillation liquide.

L'activité totale incorporée dans les tissus peut représenter 20 à 25% de l'activité ingérée. Après arrêt de l'apport en  $^{14}\text{C}$ , une élimination journalière de 20% de l'activité totale incorporée est observée. L'analyse de l'ensemble des résultats expérimentaux permettra l'application du modèle DIB à la modélisation du transfert du  $^{14}\text{C}$  aux poissons. Ces simulations permettront de prédire l'activité contenue dans les poissons en fonction des chroniques de rejets d'effluents contaminés.

## ➤ Aléas naturels

**Rihab SASSI** - Rupture dynamique 3D sur des géométries de failles complexes pour étudier les aléas ruptures de surface et mouvement sismique en champ proche.

**Flomin TCHAWÉ NZIAHA** - Numerical simulations of seismic wave propagation in complex media: impact of the spatial variability of soil properties on seismic ground motion.

**Fiiia NURMINEN** - Probabilistic fault displacement hazard analysis - Improved methodology and applications.

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

**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.

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

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

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

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

## Sujet de la thèse :

Rupture dynamique 3D sur des géométries de failles complexes pour étudier les aléas ruptures de surface et mouvement sismique en champ proche

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

Lors d'un séisme, comme l'a montré le récent séisme du Teil (Mw 4.9) en Ardèche, la croûte terrestre peut rompre jusqu'à la surface. Le déplacement produit sur la faille est alors visible et modifie la surface du sol. Dans ce travail, nous proposons d'étudier les liens entre caractéristiques physiques de la source (rupture de la faille) et caractéristiques de la rupture de surface. En effet, la rupture de surface présente une menace pour les infrastructures construites à proximité immédiate des failles actives. Les méthodes d'évaluation de l'aléa « rupture de surface » développées pour des infrastructures américaines et japonaises sont basées sur des modèles empiriques qui simplifient le rôle de la source sismique, et donc restent approximatives. L'introduction des modèles "physics-based" dans ces méthodes pourrait permettre à terme de réduire les incertitudes. Cette approche est également poursuivie à l'IRSN, par ses activités passées et au travers de sa démarche de recherche actuelle, pour réduire les incertitudes dans l'estimation de l'aléa sismique, notamment à proximité des failles actives.

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

Nous proposons de reproduire les caractéristiques de la rupture de surface associées au séisme du Baluchistan de 2013 (Mw 7.7), ce séisme présentant des observations de rupture de surface exceptionnellement riches en détails. Le code de calcul simule la rupture spontanée de la faille dans un demi-espace basé sur la méthode des éléments frontières. La première étape du travail était la vérification du code de calcul par la participation à un benchmark international. Les résultats de simulations montrent le bon fonctionnement du code. Avant de travailler sur le cas du séisme du Baluchistan, nous avons modélisé la rupture associée au séisme du Teil qui concerne directement les installations nucléaires françaises de Cruas et de Tricastin. Pour la validation de nos modèles, on utilise les mesures de déplacements du sol obtenues par la technique de corrélation d'images satellitaires optiques.

## Sujet de la thèse :

Numerical simulations of seismic wave propagation in complex media: impact of the spatial variability of soil properties on seismic ground motion

Doctorant : Flomin TCHAWÉ NZIAHA  
 Date du début de la thèse : 06/11/2017  
 Laboratoire : PSE-ENV/SCAN/BERSSIN  
 Tuteur de thèse : Céline GELIS  
 Directeur de thèse : Luis-Fabian BONILLA - IFFSTAR  
 École doctorale : Université Paris-Est / Sciences, Ingénierie et Environnement  
 Financement de thèse : IRSN

It is well known that the characteristics of superficial geological layers can alter seismic wave propagation and may produce large ground motion amplifications during earthquakes. For the case of sedimentary basins, their geometry can furthermore lead to seismic wave focusing, hence complexifying the ground motion variability. Such site effects can lead to severe damage of infrastructures and loss of lives. The proper assessment of these site effects is therefore important for the purpose of seismic hazard evaluations. Research at the BERSSIN laboratory is aimed towards a better characterization and understanding of seismic site effects both empirically, and numerically through the development of numerical tools for seismic wave propagation which can be used to understand and predict site effects. In this sense, a PhD thesis by Oral Elif (2013 -2016) held at the BERSSIN laboratory, whose objective was to implement different material rheologies in a 2-D code for simulating seismic wave propagation from small to large amplitude ground motion.

In this thesis, we take a step further by introducing spatial variability in soil properties (small-scale soil heterogeneities) in the code in order to study their effect on surface ground motion for the purpose of seismic hazard assessment.

This thesis is organized as follows; we first develop a numerical code to model soil heterogeneities, the soil heterogeneities are modeled statistically as a stationary, homogeneous random process with a 2-D Von Karman autocorrelation function; secondly, we investigate the effect of small-scale soil heterogeneities on seismic ground motion (high frequency effect) through a sensitivity study, and finally we assess site effects using soil heterogeneities properties coming from in-situ measurements.

Using a detailed 2-D velocity model of the Nice (France) sedimentary basin to simulate seismic wave propagation, we present results on the effect of velocity heterogeneities within the basin on surface ground motion. Their effect on ground motion is quantified in terms of peak ground velocity, pseudo-spectral acceleration and standard spectral ratios. We show that the presence of velocity heterogeneities increases ground motion variability and may increase or decrease the spectral amplification depending on the local properties of the random media. Thus, the amplitude of the heterogeneities controls at the first order the ground motion variability. This shows that, when significant, such small-scale heterogeneities have an impact on the seismic response of sedimentary basins and cannot be neglected. This study highlights the importance of constraining soil heterogeneity statistical parameters from field data.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Fiiia NURMINEN
Date du début de la thèse :	01/11/2018
Laboratoire :	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN
Tuteur de thèse :	Stéphane BAIZE
Directeur de thèse :	Paolo BONCIO - Université de Chieti
École doctorale :	Université de Chieti (IT)/DiSPuTer
Financement de thèse :	IRSN/Université de Chieti

The hazard associated to active tectonic faults can be addressed either by fault zoning and avoidance, or by probabilistic approach especially in case of structures in the areas where avoidance approach is not sufficient. This PhD project aims at enhancing the methodology for obtaining the empirical parameters for modelling the probabilistic fault displacement hazard. The project started in November 2018 and is executed in co-operation between IRSN and University of Chieti in Italy, in close collaboration with California Geological Survey and other American counterparts working on PFDHA.

In the beginning of the project, the emphasis has been in obtaining and complementing the empirical dataset of the historical earthquakes (SURE database; Baize *et al.*, 2019<sup>[1]</sup>). The emphasis has been in fixing the database structure, and standardizing the data collecting work flow avoiding the need of compiler interpretation. The dataset of thrust faults is considered complete regarding the historical events with georeferenced surface rupturing maps and localized slip parameters available in published literature, the datasets of the other fault types (normal and strike-slip) are to be completed.

During the first year of the project, the analysis of the surface rupturing parameters has been concentrated on distributed (off-fault) rupturing on thrust faulting earthquakes. The methodological approach used is in line with the previous research done (see e.g. Youngs *et al.*, 2003<sup>[2]</sup>, Petersen *et al.*, 2011<sup>[3]</sup>), but significant enhancements have been developed. Methodological improvements have been suggested both for obtaining the probability of distributed rupturing occurrence, and for calculating the local normalization factor needed for bringing together slip parameter data from various events. A scientific article regarding the regression parameters of distributed surface rupturing of thrust earthquakes has been prepared, and it is expected being published in early 2020.

The next step in the project is to apply the newly developed approach to the analysis of other fault types, and include the primary faulting parameters. After finalizing the dataset of the normal faults, the empirical parameters will be obtained for normal and combined dip slip datasets in similar manner to the thrust faults. The hypothesis is that the dip slip data (normal and thrust) can be analysed similarly, but eventually some methodological adjustments will be done for the analysis of the strike-slip faults. The final target of the project is to develop an open-source model for PFDHA, and apply it to the sites of different kinematics.

[1] Baize, S., Nurminen, F., Sarmiento, A., Dawson, T., Takao, M., Scotti, O., Azuma, T., Boncio, B., Champenois, J., Cinti, F.R., Civico, R., Costa, C., Guerrieri, L., Marti, E., McCalpin, J., Okumura, K., Villamor, P.: A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses, *Seismological Research Letters*, 91 (1) :499-520, 2019.

[2] Youngs R.R., Arabasz W.J., Anderson R.E., Ramelli A.R., Ake J.P., Slemmons D.B., McCalpin J.P., Doser D.I., Fridrich C.J., Swan III F.H., Rogers A.M., Yount J.C., Anderson L.W., Smith K.D., Bruhn R.L., Kneuper P.L.K., Smith R.B., dePolo C.M., O'Leary D.W., Coppersmith K.J., Pezzopane S.K., Schwartz D.P., Whitney J.W., Olig S.S., and Toro G.R.: A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, 19 (1), 191-219, 2003.

[3] Petersen M.D., Dawson T.E., Chen R., Cao T., Wills C.J., Schwartz D.P. & Frankel A.D.: Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101 (2), 805-825, 2011.

## Sujet de la thèse :

## Characterizing past ground motions from an archaeoseismological approach

Doctorant :	Arnaud MONTABERT
Date du début de la thèse :	01/10/2017
Laboratoire :	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN - PSN-EXP/SES/LMAPS
Tuteur de thèse :	Maria LANCIERI/Julien CLEMENT
Directeur de thèse :	Hélène LYON-CAEN, Laboratoire de Géologie de l'ENS, CNRS
École doctorale :	Sorbonne Université
Financement de thèse :	Sciences de la Terre, de l'Environnement et Physique de l'Univers Allocation Spécifique ENS

Historical earthquake catalogues are one of the building blocks for the assessments of seismic hazard. In spite of many years of research in the archives, many earthquakes remain poorly known. New sources of information are hence required. Among these, historical buildings witnessed earthquakes recorded in their walls as structural disorders, repairs. Indeed, the BERSSIN is involved, since early 90s, in research actions promoting multidisciplinary approach to improve the knowledge of past earthquake impact on buildings.

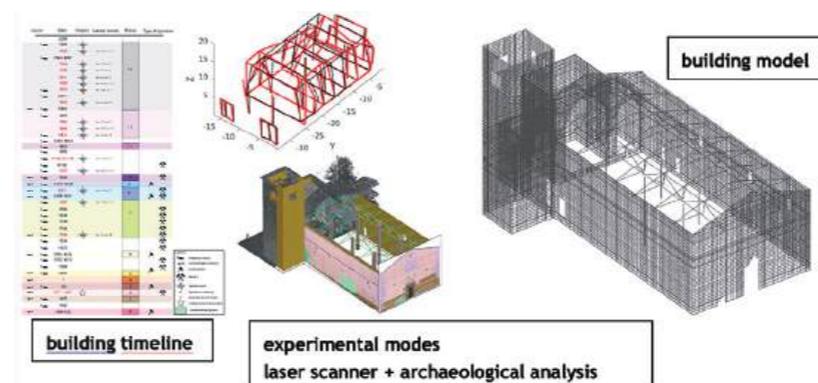
In this thesis we are moving a step forward by introducing a multidisciplinary approach aimed to analyse the seismic ground motions necessary to explain building repairs/disorders. The main steps are: setting the evolution of the building over time by identifying the repairs compatible with failure mechanisms due to earthquakes; defining a mechanical model of the building; selecting accelerograms compatible with a given earthquake; reproducing digitally the observed damage.

The test case is the medieval church of Sant'Agata, an exceptional site with many historical sources describing the damages induced by past earthquakes, and their renovation. The site is located in the Mugello basin (central Apennines, Italy), characterized by a moderate seismicity. The largest known events occurred in 1542 (Mw~6) and 1919 (Mw~6.3).

The two archaeological campaigns I conducted, along with an in-depth study of historical texts, allowed to determine the building evolution along the centuries (materials, construction phases, repairs) and to identify the mechanical failure modes occurred after each earthquake. I thus defined a mechanical model of the church whose geometry is based on the laser scanner data and the constructive phases previously identified. To merge archaeological and geometric information I developed an ad hoc meshing code.

Concerning the mechanical behaviour, I actively participated to the instrumental campaigns aimed to characterise the building vibration modes by recording its response to the seismic noise.

Initial results demonstrate the strength of the proposed methodology. The next steps are the refinement of the mechanical model and the implementation of a first set of dynamic analysis to characterize each historical ground motion.



## 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

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

Les Alpes occidentales sont caractérisées par une sismicité modérée mais persistante. Cette thèse présente un double objectif :

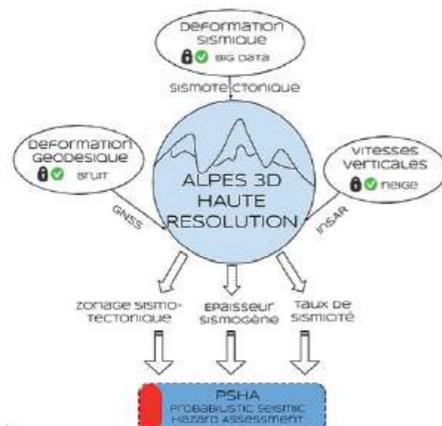
1) préciser les moteurs de cette déformation de surface qui reste mal comprise,  
 2) apporter des données et outils pour mieux caractériser l'aléa sismique (PSHA) au travers de **zonage sismotectonique (épaisseur sismogène)** et de **taux de sismicité**. Il s'agit pour cela d'étudier les interactions entre déformations horizontale et verticale, et entre déformations de surface et sismicité. Trois méthodes doivent être mises en place puis intégrées conjointement au cours de cette thèse : (i) l'analyse sismotectonique de la base de données Sismalp, (ii) le traitement des données de GPS permanent et de campagnes, (iii) et le traitement des données d'interférométrie radar (InSAR) acquises depuis 2014.

Le traitement des données de campagne **GNSS** conjointement aux solutions permanentes ont permis d'augmenter la résolution des champs de vitesses et de **déformation géodésiques**. Il apparaît que le maximum de déformation horizontale est localisé dans le Briançonnais et est compatible avec de la déformation intersismique localisée sur au moins une faille.

Le traitement en interférométrie radar (**InSAR**) de quatre années consécutives de données du satellite Sentinel-1 a permis pour la première fois dans les Alpes de s'affranchir de la couverture neigeuse et végétale et des effets atmosphériques liés à la topographie pour obtenir une carte de **vitesses verticales** à l'échelle des Alpes occidentales. Une analyse approfondie des résultats est encore nécessaire afin de pouvoir conclure en termes d'interprétations tectoniques.

L'analyse de la **déformation sismique** a permis d'atteindre une résolution de la variabilité spatiale du style de déformation inégalée jusqu'ici dans les Alpes occidentales. Le calcul des mécanismes au foyer et leur inversion ont apporté des éléments novateurs en termes d'implications géodynamiques. Afin d'extraire le signal robuste parmi les différents mécanismes au foyer, une interpolation bayésienne 2D du style de déformation est en cours de réalisation.

L'analyse de la déformation sismique montre que les taux de déformation sismique calculés ne sont probablement pas représentatifs du taux de sismicité long terme. Une autre approche doit alors être envisagée dans laquelle la sismicité historique est prise en compte.



## Sujet de la thèse :

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

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

Le calcul de l'aléa sismique se fonde sur des chroniques de sismicité courtes (instrumentales <100 ans ; historiques <1000 ans) et sur l'hypothèse que les taux de sismicité sont stables dans le temps. La couverture temporelle limitée des catalogues de sismicité ne permet pas d'identifier d'éventuelles variations de la sismicité à l'échelle de 10ky, ni de caractériser la récurrence d'événements sismiques majeurs dont les traces sont difficiles à détecter par les techniques classiques de paléosismologie.

Dans la région Rhône-Alpes où se situe le CNPE du Bugey, plus de vingt séismes d'intensité épicentrale supérieure ou égale à VII ont été recensés depuis le XV<sup>e</sup> siècle et une activité tectonique holocène a été mise en évidence sur un système de failles situé à 30 km de la centrale (dans les lacs d'Annecy et du Bourget, De La Taille *et al.* 2015). Plusieurs études sur les séquences sédimentaires de lacs pré-Alpins présentent ces dépôts comme une archive d'événements sismiques, avec un potentiel événement majeur identifié entre 10 000 et 9 000 cal. BP (Arnaud *et al.* 2012). Pour ma thèse, l'étude de nouvelles séquences lacustres varvées (haute résolution temporelle) du lac d'Aiguebelette est menée pour établir une chronique de la sismicité depuis 12 000 ans BP au front des Alpes et déconvoluer les forçages externes (climatiques, environnementaux et anthropiques) dont les signatures physico-chimiques sont enregistrées dans le sédiment. Ces travaux ont pour but de (1) caractériser l'évolution de la sismicité régionale dans le temps, (2) discriminer les différents forçages externes pouvant impacter cette évolution et (3) confronter la chronique de sismicité établie aux hypothèses retenues pour définir localement l'aléa sismique.

Le programme de ma thèse s'organise en trois volets principaux :

(1) L'analyse sédimentologique et géochimique pour extraire les informations paléo-climatiques et environnementales nécessaires à la caractérisation des homogénites (dépôts associés aux séismes). L'étude des varves permettra un calage annuel, calibré par l'imagerie hyperspectrale et des datations radiocarbone ;



Lac d'Aiguebelette

(2) L'analyse des propriétés magnétiques des sédiments pour caractériser 1) l'impact des sollicitations sismiques sur la disposition planaire des phyllosilicates et distinguer l'origine des homogénites, 2) les processus bio-géochimiques à l'origine des particularités magnétiques des homogénites (Crouzet *et al.*, 2017) ;

(3) La sensibilité du lac à enregistrer la sismicité sera étudiée finement de manière à évaluer la complétude de la chronique des séismes déduite de l'analyse sédimentaire. Une première approche consistera à identifier les événements historiques connus afin d'évaluer l'intensité sismique au lac nécessaire à l'enregistrement d'un événement.

Références: Arnaud F., Revillon S., Debret M. *et al.* 2012, *Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology*. *Quaternary Science Reviews* 51: 81-92.  
 Crouzet C., Sabatier P., Wilhelm B., Demory F., Beck C., 2017: "Magnetic characterization of instantaneous sedimentary deposits: examples from alpine lakes". International Meeting of Sedimentology, October 10-12 2017, Toulouse France.  
 de La Taille, C., 2015. Évaluation de l'activité tectonique quaternaire des failles du Jura Méridional (France). Thèse de doctorat, Grenoble Alpes.

## Sujet de la thèse :

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

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

La Vallée de l'Ubaye est une des zones les plus sismiquement actives de France. Le 5 avril 1959, un des plus forts séismes enregistrés au XX<sup>e</sup> siècle s'y est produit avec une magnitude estimée à  $M_w$  5,2. Plus récemment, deux autres forts séismes s'y sont produits le 26 février 2012 ( $M_w$  4,1) et le 7 avril 2014 ( $M_w$  4,8). À la suite du séisme de 2014, un nombre anormalement élevé de répliques a été observé. Par ailleurs, plusieurs essaims caractérisés par l'occurrence de nombreux petits séismes sur une longue durée sont connus dans cette zone. Les processus physiques à l'origine de cette dualité de comportement restent mal compris.

Pour comprendre ce phénomène, je vais me concentrer dans un premier temps sur la sismicité faisant suite au séisme de 2014 à partir de la détermination des mécanismes au foyer et d'une analyse statistique de ces séismes. L'objectif est de spatialiser l'état de contrainte de la croûte pendant la période d'analyse et de différencier les processus qui en sont à l'origine (pression fluide, tectonique).

Mon objectif est ensuite d'étendre l'analyse à l'ensemble de la crise sismique de 2012-2019. La première étape consistera à construire un catalogue en appliquant les techniques de *template-matching*. Le comportement spatial et temporel de l'ensemble de cette crise sera comparé avec celui d'autres crises plus anciennes enregistrées dans la vallée. Une analyse élargie spatialement et temporellement vis-à-vis de la sismicité historique connue permettra de préciser le contexte sismotectonique de la région.

Enfin, l'objectif est de dégager des comportements plus génériques sur la sismicité en essaim. Je confronterai les paramètres obtenus, régissant l'essaim de sismicité de la Vallée de l'Ubaye, avec ceux contrôlant d'autres essaims de sismicité naturelle (Golfe de Corinthe) ou de sismicité induite (Oklahoma).

De manière plus générale, ma thèse s'inscrit à l'IRSN dans un objectif de « caractériser les sources géologiques qui contrôlent l'aléa sismique ». Dans le cas de la vallée de l'Ubaye et dans d'autres régions des Alpes et en France, différents processus physiques, tectoniques ou non, aboutissent à des comportements sismiques variés. Parmi eux, les essaims de sismicité que j'étudie n'obéissent pas au principe d'indépendance en espace et en temps des sources sismiques (approche poissonienne) que le calcul probabiliste de l'aléa sismique (PSHA) prend en hypothèse. Par conséquent, une meilleure compréhension des différents moteurs de la sismicité de la région permettra de mieux définir les modèles de l'aléa à utiliser.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Laurie SAINT CRIQ  
Date du début de la thèse : 02/01/2020  
Laboratoire : PSE-ENV/SCAN/BEHRIG  
Tuteur de thèse : Yasser HAMDI  
Directeur de thèse : Eric GAUME – IFSTTAR  
Co-directeur : Taha OUARDA - INRS  
École doctorale : Université Paris-Est/Sciences, ingénierie et environnement  
Financement de thèse : IRSN/INRS

L'estimation des niveaux d'aléas naturels à prendre en compte pour la protection des sites nucléaires constitue un enjeu de sûreté important pour l'IRSN. Depuis plusieurs années, le BEHRIG utilise l'analyse fréquentielle des événements pour définir ces niveaux en utilisant de l'information régionale et historique en réponse à la faible qualité des séries de données utilisées (séries courtes, trous de mesures, population mixte, présence d'un horsain ...). Aujourd'hui, l'enjeu est d'ajouter les deux types d'informations ensemble dans une analyse fréquentielle. L'information régionale renforce l'ajustement statistique au niveau du corps de la distribution. L'information historique améliore l'estimation des valeurs exceptionnelles au niveau de la queue droite de la distribution. L'objectif est de développer un modèle d'analyse statistique (fréquentielle ou bayésienne) des événements extrêmes en prenant en compte de l'information additionnelle (régionale et historique). La thèse vise à proposer des approfondissements afin de mieux : i) prendre en compte la dépendance spatiale des observations régionales pour l'information régionale, ii) calculer la durée effective de l'échantillon total pour l'information historique, iii) garantir l'exhaustivité de l'information. Le modèle va être développé dans un premier temps sur la surcote qui est une variable explicative de l'aléa submersion marine, mais le modèle définitif devrait s'adapter à d'autres aléas hydrométéorologiques (températures, pluies, vents extrêmes ...). Les résultats devraient être directement applicables à l'expertise de sûreté nucléaire.

La première moitié de la thèse se déroule à l'IRSN, la seconde moitié au centre Eau Terre Environnement de l'INRS où elle sera encadrée par le professeur Taha Ouarda. Cette collaboration sera très utile pour résoudre les problématiques énoncées précédemment. En effet, l'équipe du professeur Taha Ouarda est spécialiste de l'hydrométéorologie statistique et des modèles statistiques en environnement. La première partie consiste à dresser un état de l'art de l'existant dans les statistiques des extrêmes et de se familiariser avec les notions de probabilités et statistiques tels que la durée effective, le seuil de perception, la période historique, les données additionnelles, l'analyse bayésienne et les outils d'analyse fréquentielle. En même temps, il s'agit de se familiariser avec les notions d'hydrologie et de collecter les données marégraphiques ainsi que l'information historique. La deuxième partie consiste à développer le modèle statistique en utilisant les méthodes de l'analyse fréquentielle locale et régionale, appliquer le modèle aux données et l'ajuster.

## 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 – Laboratoire de Météorologie Dynamique
École doctorale :	Sorbonne Université/Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN/CSTB

Cette thèse, co-encadrée par l'IRSN et le CSTB, s'inscrit dans le cadre du traitement de la question 2 « Comment mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur l'installation par des sollicitations ou agressions internes et externes (y compris naturelles) et qui pourraient impacter la sûreté ? » rattachée au domaine « sûreté-sécurité ». Parmi ce thème, elle se rattache à l'Enjeu 6 « Définir des stratégies pour l'évaluation statistique des aléas hydrométéorologiques extrêmes » dont l'enjeu est la production de connaissances et le développement de méthodes et d'outils nécessaires à la caractérisation des événements hydrométéorologiques extrêmes et les influences des changements environnementaux.

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

La démarche envisagée consiste en la différenciation des phénomènes responsables de vents extrêmes et la caractérisation séparée de chaque phénomène avec une méthode adaptée sur tout le territoire. Pour permettre la pérennité de l'étude : l'analyse et la recherche de tendance parmi les observations considérées sont réalisés et l'investigation de l'évolution de l'aléa sur le long terme à l'aide des résultats d'un modèle de climat est prévu.

Les premiers résultats indiquent des comportements différents dans les extrêmes de vitesses de vents selon le temps d'intégration des vitesses de vents (intégrées sur un pas de temps 3 secondes ou 10 minutes) ainsi que selon les périodes saisonnières considérées. Cette disparité s'explique par la présence de différents phénomènes possédant des caractéristiques d'occurrence et d'évolutions différentes. Ainsi, la suite de la thèse se concentrera sur l'élaboration d'une méthodologie s'appuyant sur la différenciation des événements et des saisons dans la caractérisation statistique des vents extrêmes. En parallèle de ces travaux, une approche statistique régionale sera développée en collaboration avec Météo-France pour calculer des durées de retour spatialisées dans le but de remédier à l'influence de l'environnement de la station d'observation sur la durée de retour calculée.

### ► Cœur combustible Thermohydraulique

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

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

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

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

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

**Jimmy MARTIN** - Étude expérimentale et modélisation de l'auto-vaporisation gravitaire en piscine de désactivation du combustible.

## Sujet de la thèse :

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

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

Lors d'un APRP, les gaines d'un réacteur à eau pressurisée peuvent subir des sollicitations thermomécaniques sévères. La température des gaines peut s'élever à plus de 1000°C et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la gaine peut dépasser 100 bar. Initialement les gaines s'oxydent en face interne et externe lors du fonctionnement normal. Pendant l'accident, l'oxydation des gaines est accélérée par la montée en température de celle-ci. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermomécanique de la gaine sous de telles conditions de chargement en prenant en compte son état d'oxydation. Ce travail s'appuie sur une démarche en deux temps.

Dans un premier temps, des essais semi-intégraux de ballonnement de gaine sous chargement thermomécanique imposé sont en cours de réalisation. Ces essais permettront, par analyse paramétrique, d'étudier l'influence de l'épaisseur de pré-oxyde, de l'atmosphère (argon, mélange argon + dioxygène), ou encore du chargement thermomécanique (fluage isotherme et anisotherme) sur le ballonnement et l'éclatement des gaines. Ces essais sont réalisés sur la plateforme expérimentale Ellie (D. Campello 2017), (T. Jailin 2018) au LaMCoS à l'INSA de Lyon. L'instrumentation du banc d'essai permet de suivre le ballonnement des gaines en couplant mesure de champs cinématiques et thermiques sur la surface de l'éprouvette. Par rapport aux thèses précédentes, le verrou expérimental réside dans la caractérisation des fissures qui se développent en surface externe dans la couche d'oxyde ainsi que leur prise en compte dans le post-traitement des mesures de champs. Les essais devront ainsi permettre de caractériser l'évolution du déplacement de la surface externe de l'éprouvette, l'évolution de sa fissuration et l'évolution de sa température au cours du ballonnement.

Dans un deuxième temps, une modélisation des gaines par une structure sandwich (Zircone/Zy-4/Zircone) par éléments finis intégrant un couplage multi physique (diffusion de O, oxydation, fluage, fissuration) a été mis en place. Les outils numériques pour simuler les discontinuités (fissuration, oxydation) sont basés sur des approches en champs de phases. Les résultats des simulations en accord avec l'expérimental mettent en évidence l'effet du pré-oxyde et de l'atmosphère oxydante sur la vitesse de ballonnement. La diffusion d'oxygène dans le métal tend à réduire la vitesse de ballonnement. La couche d'oxyde quant à elle joue un rôle renfort tant qu'elle n'est pas fissurée, après fissuration une localisation des déformations dans les zones où le métal se retrouve à nu est observée.

## Sujet de la thèse :

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

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

Lors d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), une augmentation de la température du combustible ainsi que la chute de la pression dans le cœur du réacteur peut survenir et éventuellement conduire à des déformations importantes voire à la rupture des gaines des crayons de combustible. Par conséquent, l'efficacité du refroidissement du cœur effectué par les systèmes d'injection de sécurité et les hydro-accumulateurs peut être compromise. La compréhension de l'ensemble de ces phénomènes constitue un enjeu de sûreté important. Afin de les étudier et d'améliorer cette compréhension, l'IRSN a développé un outil de simulation (DRACCAR) dont l'objectif est de reproduire l'ensemble des phénomènes mécaniques, chimiques et thermohydrauliques caractéristiques d'un APRP.

Les outils de simulation comme DRACCAR ont besoin d'être validés, c'est à dire que leurs résultats doivent être confrontés à des résultats expérimentaux sur l'ensemble des phénomènes physiques qu'ils doivent reproduire. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente thèse. D'un point de vue thermohydraulique, il est essentiel que DRACCAR puisse simuler les différents mécanismes de transfert de chaleur se produisant au niveau d'un sous-canal d'un assemblage combustible. Il faut dans un premier temps les identifier, ce qui sera réalisé en effectuant des essais bien instrumentés sur l'installation COLIBRI (figure) et dans un second temps les valider ou les implémenter dans le logiciel s'ils sont manquants.

L'installation COLIBRI permet de reproduire l'écoulement fluide caractéristique dans un sous canal (espace fluide entre 4 crayons combustibles) partiellement bouché et les échanges parois/fluides caractéristiques d'un APRP s'y déroulant. Elle est équipée de plusieurs systèmes de mesures permettant d'avoir accès à l'évolution de la température de la section d'essais (mesure par caméra infrarouge) mais également aux caractéristiques de l'écoulement vapeur/gouttes (mesure de la densité de population et de la vitesse des gouttes par Analyse par Phase Doppler (PDA) ainsi que de la température des gouttes par Fluorescence induite par Laser).

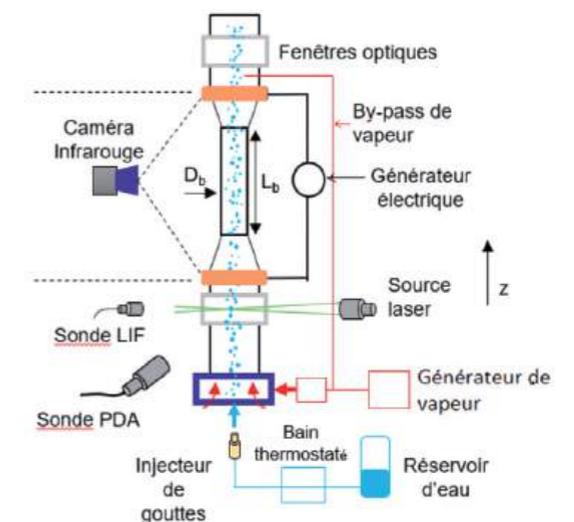


Schéma représentatif de la boucle COLIBRI

## Sujet de la thèse :

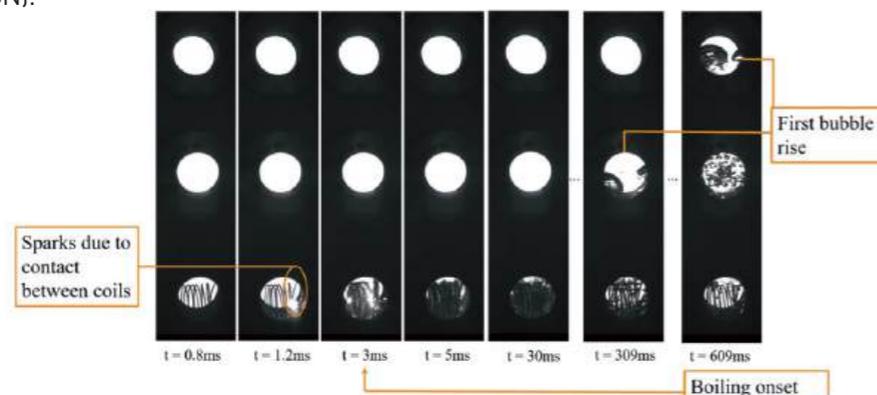
## Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide

Doctorant :	Jean MULLER
Date du début de la thèse :	05/10/2018
Laboratoire :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Marc CLAUSSE - CETHIL
École doctorale :	Université de Lyon/Mécanique, Energétique, Génie civil Acoustique
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 génération 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 dont on fait varier les conditions entre un liquide à saturation et un liquide sous-refroidi. L'utilisation d'un élément de tungstène permet – par effet Joule – de reproduire un choc thermique violent entre un élément extrêmement chaud et le réfrigérant relativement froid. La mise en place de hublots permet la visualisation des phénomènes d'ébullition (croissance et détachement des bulles) et des phénomènes de transport de vapeur le long du tube (dans le cas saturé) ou de recondensation rapide (dans le cas sous-refroidi). Nous pouvons par exemple observer, sur l'image ci-dessous réalisée sur un cas saturé, la vaporisation autour du filament puis la progression d'un front de bulle dans la section d'essai. Le dispositif permet ainsi de caractériser de manière synchronisée le transfert d'énergie vers le CO<sub>2</sub>, la dynamique de formation de la vapeur, et les ondes de pression. On analyse alors la corrélation entre ces phénomènes afin de valider leur modélisation par des approches analytiques et numériques (logiciel CIGALON développé par l'IRSN).



## Sujet de la thèse :

## Couplage Neutronique-Thermohydraulique-Thermomécanique pour la modélisation des accidents dans des systèmes nucléaires

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

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. 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 transitoires avec l'expérience Godiva aux Etats Unis à Los Alamos National Laboratory (LANL), les scénarios hypothétiques des accidents de criticité dans des piscines combustible, les systèmes nucléaires avec des combustibles liquides tels que des sels fondus combustible (MSRs) ou les expériences déroulées dans le réacteur SILENE. Nombreux phénomènes physiques peuvent être énumérés dans ces situations, par exemple : l'effet Doppler et de la densité, l'expansion thermique et les contraintes thermomécaniques (Godiva), les écoulements laminaires ou turbulents (piscine combustible), les phénomènes de transfert de masse et d'énergie dans des milieux poreux (piscine combustible).

Tel qu'expliqué auparavant, l'implémentation numérique du couplage proposé 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 réalisée.

## Sujet de la thèse :

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

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

En cas d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) impliquant une brèche sur le circuit primaire d'une centrale nucléaire, il est nécessaire d'injecter de l'eau borée (système d'injection de sécurité RIS) pour refroidir le cœur du réacteur et stopper la réaction en chaîne. Le système d'aspersion de l'enceinte (EAS) est aussi utilisé afin de réduire la pression dans le bâtiment réacteur. Ces deux systèmes de sécurité sont dans un premier temps alimentés par un réservoir d'eau dédié, ensuite sur un seuil niveau bas, il y a un passage en mode recirculation où l'eau collectée (eau provenant de la brèche et eau des systèmes EAS/RIS) au niveau du puisard, situé au fond de l'enceinte de confinement, est réinjectée dans le cœur après avoir été préalablement filtrée grâce à des filtres situés dans le puisard. En situation d'APRP, des débris sont générés et peuvent être partiellement transportés jusqu'aux filtres des puisards. Ces débris peuvent contribuer au colmatage « physique » et potentiellement « chimique » de ces filtres. La contribution « chimique » correspond à la formation de précipités au sein du lit fibreux. La formation de ces précipités résulte de la présence en solution de cations métalliques suite à la corrosion des isolants et des surfaces métalliques. Ce colmatage peut entraîner une défaillance des systèmes de recirculation RIS/EAS et potentiellement conduire à un accident grave, le cœur du réacteur n'étant plus suffisamment refroidi.

Pour être en mesure d'appréhender cette situation, améliorer la compréhension du phénomène de colmatage « chimique » est nécessaire. L'objectif de ces travaux de recherche est d'étudier la nature des effets chimiques et leurs ampleurs, afin de déterminer les seuils critiques en concentration d'espèces, au-delà desquels le risque de colmatage est avéré.

Pour mener à bien cette étude, trois axes de travail ont été identifiés. Une première partie sera orientée sur la formation en statique des potentiels précipités susceptibles de se former en situation d'APRP. Par la suite, des essais seront réalisés dans une boucle en recirculation, dans lequel des débris y seront injectés en respectant les facteurs d'échelle. Des mesures en ligne (pH, turbidité, température et pression) seront effectuées, afin de pouvoir étudier leur impact sur le colmatage « chimique ». Enfin, Les résultats des essais statiques et en boucle seront couplés à une approche thermodynamique grâce à des outils de calcul de type géochimique, afin de vérifier la cohérence entre les précipités obtenus et ceux prédits.

## Sujet de la thèse :

## Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation gravitaire en piscine de désactivation du combustible

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

En cas de perte prolongée du refroidissement d'une piscine de désactivation, la chaleur dégagée par le combustible entreposé est transmise à l'eau, qui s'échauffe alors progressivement et se vaporise. À l'instar des geysers, la grande profondeur des piscines de près de 10 mètres, conduit à une variation verticale du point d'ébullition de l'eau de l'ordre de 20°C. L'eau peut ainsi dépasser son point d'ébullition en remontant au sein du bassin : elle est alors dite *surchauffée*. Il s'agit d'un état d'équilibre métastable, dont le maintien est conditionné par l'absence de petites bulles ou *germes gazeux* au sein du liquide. En présence de germes gazeux, le liquide surchauffé se vaporise, puisant la chaleur nécessaire en son sein : c'est l'autovaporisation.

Une telle autovaporisation induit la présence de bulles dans la piscine, ce qui a potentiellement des conséquences sur la conduite de l'installation. Ces bulles peuvent capter et transporter les espèces radioactives gazeuses dissoutes dans l'eau. Leur éclatement en surface du bassin est ainsi une source potentielle d'aérosols contaminés et de transferts de radioactivité vers l'environnement. De plus, leur présence peut compromettre la reprise du refroidissement en cours d'accident par le système de refroidissement de l'installation, les pompes de ce système pouvant caviter voire se désamorcer en cas d'aspiration de gaz et/ou d'eau surchauffée.

Le phénomène reste pour l'heure peu connu dans la configuration particulière d'un bassin de grande hauteur. Deux questions ouvertes motivent cette thèse : d'où proviennent les germes gazeux par lesquels s'initie l'autovaporisation ? Quel est le rôle joué par la convection naturelle au sein du bassin sur l'autovaporisation ? Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé pour reproduire à échelle réduite la configuration d'une piscine de désactivation et les conditions d'occurrence du phénomène. En jouant sur la pression et la puissance de chauffage, il s'agit de comprendre les conditions propices à la génération de germes et d'en quantifier les proportions.

Les essais réalisés en première année ont montré que le dispositif reproduit la phénoménologie attendue. Depuis, des modifications matérielles ont permis d'étendre les points de fonctionnement du dispositif, rendant notamment possible l'obtention de surchauffes plus élevées. Il a en outre été équipé d'une sonde permettant la mesure de la concentration d'oxygène dissous dans le réservoir, paramètre dont l'influence sur le phénomène a été mise en évidence lors des premiers essais. Nous avons également montré le rôle des germes gazeux au sein du liquide sur l'autovaporisation. Un moyen de mesure de la population de germes par spectroscopie ultrasonore est en cours de développement, avec le support de V. Leroy de l'Université Paris-Diderot et de Q. Grandu du SEREX/LR2E. Sur cette base, nous poursuivons nos essais de caractérisation du phénomène.

## ➤ Neutronique - Criticité

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

**Vivian SALINO** - Développement d'une méthode d'optimisation de calculs de cœur de 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.

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

## 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 / Mireille COSTE-DELCLAUX  
 Directeur de thèse : Luiz LEAL - IRSN  
 École doctorale : Université Paris-Saclay/PHENIICS  
 Financement de thèse : IRSN/CEA

Les codes de calcul neutronique (transport, évolution...) utilisés en physique des réacteurs, en criticité ou en radioprotection utilisent des données nucléaires, qui modélisent les interactions entre un neutron et un noyau cible. Parmi ces données, on retrouve notamment les sections efficaces de réaction, qui expriment la probabilité qu'une réaction nucléaire survienne. Ces probabilités sont des fonctions de la température et de l'énergie du neutron incident, et présentent de fortes variations appelées résonances, dues au couplage entre l'énergie du neutron et les niveaux d'énergie du noyau cible. Dans la gamme d'énergie épithermique, les résonances deviennent si proches qu'elles ne peuvent plus être distinguées expérimentalement : ce domaine est appelé domaine des résonances non résolues. Seules les valeurs moyennes des paramètres expérimentaux permettant de calculer les sections efficaces résonantes sont accessibles.

Le domaine des résonances non résolues nécessite alors un traitement probabiliste particulier ; une méthode Monte-Carlo de ré-échantillonnage de résonances permet d'obtenir les densités de probabilité des sections efficaces, depuis lesquelles il est possible d'obtenir des tables de probabilités utilisées par la suite dans les codes de calcul neutroniques. De tels algorithmes sont implémentés dans des codes de traitement de données nucléaires, le plus connu étant NJOY (Los Alamos National Laboratory). A l'IRSN, le code de traitement des données nucléaires GAIA2 est en développement, afin d'évaluer la pertinence des méthodes et des hypothèses de NJOY.

Plusieurs paramètres de la méthode ont été étudiés pendant la thèse. En particulier, la manière d'échantillonner les résonances a été examinée (nombre de résonances, lois statistiques suivies par les paramètres, effets d'autocorrélation), ainsi que la méthode de discrétisation pour obtenir des tables de probabilités. Certaines approximations de calcul existantes dans la majorité des codes de traitement des données nucléaires (maillage énergétique, approximations dans la théorie de la matrice R lors du calcul des sections efficaces) sont encore à évaluer. Toutes les méthodes développées ont été implémentées dans le code GAIA2. Les résultats ont été comparés à NJOY et au code GALILEE (CEA), et testés sur des benchmarks de criticité sensibles au domaine des résonances non résolues.

## Sujet de la thèse :

## Développement d'une méthode d'optimisation de calculs de cœur de 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

Doctorant : Vivian SALINO  
 Date du début de la thèse : 25/09/2018  
 Laboratoire : PSN-EXP/SNC/LN  
 Tuteur de thèse : Eric DUMONTEIL  
 Directeur de thèse : Alain HEBERT – École Polytechnique de Montréal  
 École doctorale : École Polytechnique de Montréal  
 Financement de thèse : 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 est donc 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.).

Lors de la première année de thèse, après avoir validé mes examens pré-doctoraux de l'École Polytechnique de Montréal ("*qualifying exams*"), j'ai réalisé un travail bibliographique sur les méthodes d'équivalence (combustible et réflecteur), sur les méthodes d'ajustement de la distribution de puissance, ainsi qu'une revue des données expérimentales accessibles dans la littérature. Je me suis ensuite intéressé à la propagation des incertitudes en pesant les avantages et inconvénients respectifs des méthodes de perturbation et de l'approche dite « Total Monte Carlo ». Cette phase préliminaire m'a permis de discuter et de cadrer la méthodologie qui sera mise en œuvre dans les années suivantes pour évaluer la distribution de puissance et ses incertitudes ou réciproquement pour améliorer les données nucléaires et leurs incertitudes à l'aide de cartes de puissance réacteur disponibles.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Romain VUIART  
 Date du début de la thèse : 08/10/2018  
 Laboratoire : PSN-EXP/SNC/LN  
 Tuteur de thèse : Mariya BROVCHENKO / Julien TAFOREAU  
 Directeur de thèse : Éric DUMONTEIL – IRSN  
 École doctorale : Université Paris-Saclay/PHEIICS  
 Financement de thèse : IRSN

L'étude du vieillissement de la cuve est une composante importante de l'analyse de sûreté associée à la prolongation de la durée de vie des réacteurs du parc français. En effet, la cuve ne peut être remplacée, et constitue à ce titre un des composants 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 neutronique (rapide et non rapide) vue par la cuve des réacteurs à eau pressurisée. La nouveauté réside dans la capacité d'une telle méthodologie à prendre en compte les spécificités (historique de puissance, gestions combustible, gestions des barres de contrôle...) de chaque réacteur et dans la possibilité d'étendre les prédictions du modèle à d'autres observables d'intérêt comme les déplacements par atome (dpa).

Afin de mettre en place une telle méthodologie la première phase du travail consiste à étudier et à comprendre les différents paramètres qui varient pendant le fonctionnement du réacteur afin d'évaluer leurs impacts respectifs lors d'un calcul de fluence cuve. Les paramètres ayant un impact significatif seront ensuite utilisés en entrée d'un schéma de calcul de référence permettant d'évaluer le plus précisément possible la fluence cuve tout en gardant un temps de calcul raisonnable. La seconde phase du travail consiste donc à développer cette méthodologie de référence.

Au cours de la première année de thèse, une première étude a été réalisée afin de quantifier l'impact de l'historique de puissance sur la fluence neutronique vue par la cuve du réacteur. Cette étude a mis en évidence que les variations de puissance du cœur influent de manière significative sur la fluence cuve et un modèle a alors été proposé pour les prendre en compte.

Dans un second temps, une étude a été menée pour quantifier l'impact d'une partie des approximations effectuées dans le schéma de calcul utilisé lors de la première étude. Les résultats obtenus ont permis d'identifier certaines améliorations à apporter au schéma de calcul pour évaluer précisément la fluence cuve.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant : Kévin FRÖHLICHER  
 Date du début de la thèse : 14/10/2019  
 Laboratoire : PSN-EXP/SNC/LN  
 Tuteur de thèse : Julien TAFOREAU / Mariya BROVCHENKO  
 Directeur de thèse : Éric DUMONTEIL – IRSN  
 Co-directeur de thèse : Alain HÉBERT - Polytechnique Montréal  
 École doctorale : Université Paris-Saclay/PHEIICS  
 Financement de thèse : IRSN

Dans le cadre de la recherche en appui à l'expertise, le laboratoire s'intéresse au développement de méthodes de modélisation haute-fidélité pour la physique des réacteurs. L'utilisation de méthodes stochastiques (Monte Carlo) permet, au prix d'un coût de calcul (ressources mémoires et processeurs) important de répondre aux exigences de précision des calculs de référence. Toutefois ce coût devient prohibitif dans les cas dynamiques où l'évolution temporelle est à prendre en compte. L'utilisation de méthodes déterministes, basées sur la résolution numérique d'équations physiques, moyennant quelques hypothèses et approximations, doit permettre d'accélérer la convergence des calculs Monte Carlo dans le cas de transitoires de puissance. En effet ces méthodes présentent des coûts de calcul beaucoup plus raisonnables (au détriment de la précision). Cette thèse a donc pour objectif la réduction de variance en Monte Carlo dynamique, en s'appuyant sur des méthodes déterministes. La nouveauté réside dans le traitement temporel de la réduction de variance, et en particulier concernant les noyaux précurseurs de neutrons retardés. Ces neutrons étant émis sur une échelle de temps bien supérieure aux neutrons dit « prompt », il est primordial de réduire la variance due à l'aspect dynamique du problème. Les résultats du programme CIP (CABRI International Program), mené par l'IRSN, seront utilisés pour valider la méthode mise en place par comparaison à des données expérimentales.

La solution technique envisagée s'appuie sur l'utilisation du flux adjoint temporel (vu comme la probabilité de participer au score final) calculé avec des méthodes déterministes. Ce flux adjoint est ensuite utilisé pour générer une carte d'importance des neutrons permettant l'emploi d'une méthode de réduction de variance, afin d'accélérer la convergence du calcul Monte Carlo en effectuant un contrôle de la population neutronique. Du point de vue technique, les codes DRAGON5 et DONJON5 seront utilisés pour la partie déterministe, tandis que le code SERPENT2 est envisagé pour la modélisation Monte Carlo.

Dans un premier temps il s'agit de mettre en place une preuve de principe sur un benchmark analytique simple (par exemple un cas mono-énergétique sur une géométrie très simple), avant de tester la méthode sur des cas plus compliqués, comme celui d'un cluster d'assemblages combustible. A terme, l'objectif final serait de modéliser le cœur du réacteur CABRI dans différents modes de fonctionnement. En effet, ce réacteur possède une configuration géométrique très particulière et introduit ainsi de fortes hétérogénéités spatiales qui sont susceptibles d'évoluer en fonction du temps, ce point représente donc un enjeu majeur pour la modélisation dynamique des réacteurs.

## ➤ Fusion du cœur

**Aymeric EDELINE** - Étude des conditions de stabilisation d'un bain de corium dans un lit de débris après renoyage du cœur.

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

## Sujet de la thèse :

## Étude des conditions de stabilisation d'un bain de corium dans un lit de débris après renoyage du cœur

Doctorant :	Aymeric EDELIN
Date du début de la thèse :	15/11/2017
Laboratoire :	PSN-RES/SEREX/LE2M
Tuteur de thèse :	Hervé MUTELLE
Directeur de thèse :	Michel QUINTARD - IMFT
École doctorale :	Université de Toulouse Sciences de l'univers de l'environnement et de l'espace
Financement de thèse :	IRSN

Lors d'un accident grave en réacteur, les éléments combustibles et de gainage peuvent en se dégradant former un lit de débris dont le centre, chauffé par la puissance résiduelle, fusionne pour créer un bain de corium.

Sans mesures de mitigation, le bain de corium peut s'étendre et mener à terme à une brèche de la cuve du réacteur. Afin de prévenir ce scénario, de l'eau doit être injectée dans le cœur afin de refroidir le corium et l'y contenir. Or, l'évolution du bain de corium immergé dans un lit de débris saturé en eau reste largement méconnue. Cette évolution est notamment pilotée par les échanges thermiques à la surface du corium, eux-mêmes limités par une grandeur d'intérêt : le flux critique, i.e le flux thermique maximal échangeable.

Le programme PROGRES en cours à l'IRSN vise à améliorer l'évaluation des conséquences du renoyage d'un cœur dégradé. Un des axes de recherche du programme consiste à développer et valider un modèle de l'impact du lit de débris sur le flux critique au niveau de l'enveloppe du bain de corium.

L'objectif de cette thèse est de caractériser l'effet d'un milieu poreux modèle sur l'apparition du flux critique d'une surface chauffante immergée en fonction de paramètres caractéristiques.

Ce phénomène sera modélisé en s'inspirant des modèles d'écoulements diphasiques en milieux poreux fortement perméables. Les prédictions du modèle seront validées par la réalisation et l'interprétation d'essais expérimentaux menés au SEREX/LE2M.

Plusieurs veines d'essais ont été mises en place permettant de mesurer le flux critique pour un disque en cuivre recouvert d'un lit de billes millimétriques saturé d'eau en fonction de l'inclinaison du disque, du débit percolant d'eau et des propriétés du lit. A terme, des calculs d'accident grave à l'échelle du réacteur pourront être menés afin d'évaluer la refroidissabilité d'un bain de corium en lit de débris dans le cœur.

Une première série d'essais, effectuée en configuration sans circulation forcée pour 2 inclinaisons de surface en fonction du diamètre des billes du lit, montre une corrélation positive entre la valeur du flux critique et le diamètre des billes du lit en cohérence avec la littérature, mais pour de grands diamètres uniquement. Le comportement pour de petits diamètres de billes n'est toujours pas expliqué et nécessite le développement d'un modèle spécifique en plus de la reprise d'essais complémentaires, en parallèle des essais avec circulation d'eau dont la section est en phase de qualification.

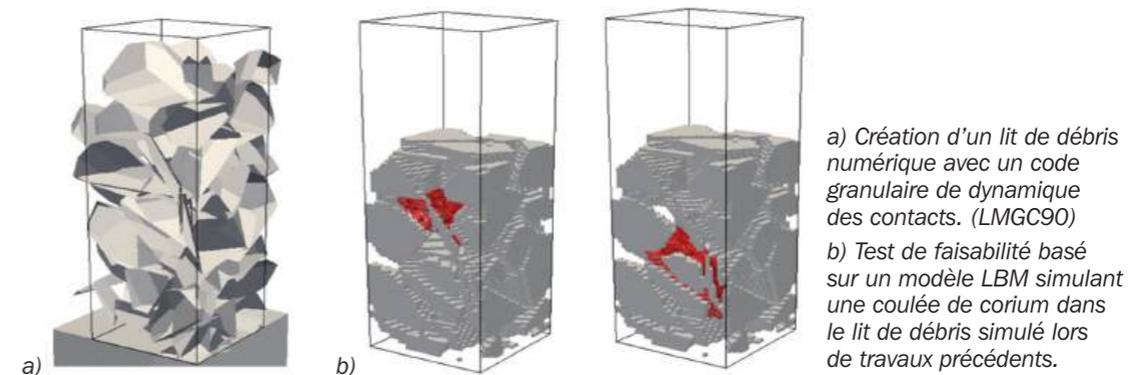
## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Juliana GARCIA SARMIENTO
Date du début de la thèse :	15/07/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SAG/LEPC
Tuteur de thèse :	Vincent TOPIN/Florian FICHOT
Directeur de thèse :	Pierre SAGAUT - M2P2
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN

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

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



## ➤ Confinement Produits de Fission

### Comportement des PF – Réacteurs

**Sandra GYASI** - Étude de l'effet du zirconium sur la vaporisation et la dégradation des crayons en AIC en conditions accidentelles sévères.

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

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

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Sandra GYASI
Date du début de la thèse :	17/12/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SAG/LETR
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN
Directeur de thèse :	Pierre BENIGNI – CNRS
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Physique et Sciences de la matière
Financement de thèse :	IRSN

In case of severe accident in a pressurized water reactor as a result of loss of coolant, the core and its components (fuel rods, internal structures or control rods) are exposed to high temperature leading to their degradation and their melting. In the particular case of control rods, the absorb alloy (silver, indium, cadmium) is likely to interact at high temperature with Zircaloy-4 guide tubes due to the deformation and melting of its cladding (stainless steel), leading to the formation of Ag-In-Zr-O multicomponent mixtures. According to the fact that the vaporization of silver strongly impacts the iodine behaviour in the primary circuit and then in the containment, the thermodynamic study of the Ag-In-Zr-O multicomponent system and in particular of the equilibrium implying the liquid phase is a necessary step for a reliable estimate of the chemical elements released during the degradation and relocation processes of the Ag-Cd-In control rods. Therefore, the aim of the thesis is to bring forth an experimental contribution to the thermodynamic investigation of the binary In-Zr, pseudo-binary  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , and ternary Zr-In-Ag subsystems which are poorly known.

The experimental contribution will include different techniques such as differential thermal analysis (DTA) for determining the phase transition temperature, X-ray diffraction for phase identification and determination of crystal structures, Scanning Electron Microscopy (SEM)/ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Electron Probe Micro Analyser (EPMA) for measuring composition of phases in equilibrium. The formation enthalpy of the different stoichiometric compounds will also be determined by dissolution and direct calorimetry measurements.

The new results obtained in the different sub-systems together with information available in literature, will be integrated in a CALPHAD modelling to establish a consistent CALPHAD description of the system.

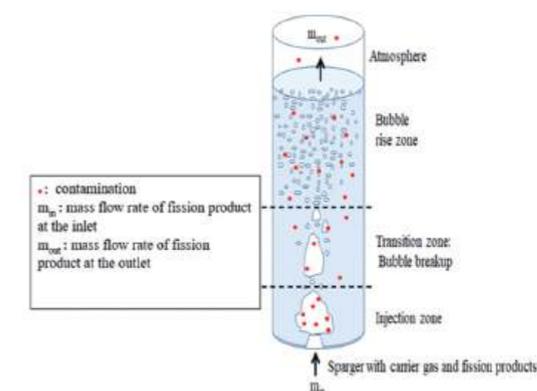
## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Mohamad FARHAT
Date du début de la thèse :	07/10/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Olivier VAUQUELIN – Aix Marseille Université
Co-directeur de thèse :	Maxime CHINAUD - Aix Marseille Université
École doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN/Région PACA/EDF

During a severe accident occurring in nuclear facilities, fission products are released from the degraded fuel, reach the containment and some parts may be released outside. The amounts of outside releases strongly depend on the efficiency of the mitigation means. For source term computations, IRSN needs to model and if possible, to enhance the efficiency of the mitigation or filtration systems implemented on LWRs. Pool scrubbing is one of these filtrations means that refers to a set of physical and chemical processes, which lead to partial retention of fission products carried by a gas flowing through a water pool, for instance pool-scrubbing exist in SGTR accident or in BWRs. The extent of the retention is linked to the parameters of bubble hydrodynamics in the water bath, such as bubble size, shape, and velocity. Thus, to qualify the hydrodynamics models it is important to have a good knowledge by establishing an experimental database concerning tests coupling hydrodynamic parameters and fission product trapping. In a first step, our work concerns the experimental characterizations for several flow regimes of both bubble hydrodynamics and retention mechanisms of iodine species (volatile or aerosol). These results are intended to contribute to the qualification of a new software under development by IRSN to simulate, fission product retention by pool-scrubbing. This software will be later on implemented in ASTEC code.

In the first year, I am currently extending the existing knowledge on bubble hydrodynamics, investigating the frequential aspect of bubbling in IUSTI Marseille, and will qualify the hydrodynamics and chemical measurement methods in a new experimental setup in IRSN Cadarache. In the second year, for different experimental parameters (flow regimes from bubbly to jet, inlet of volatile or aerosol iodine species, temperature, pH etc.), some tests will be carried out to characterize the bubble plumes by tomography and laser techniques (PIV) and to measure iodine retention to get the decontamination factor DF (ratio of inlet fission product mass flow rate to outlet fission product mass flow rate in the pool). To perform this, gas chromatography and ICP-MS techniques will be used. During these two years, these experimental results will contribute to validate/refine pool-scrubbing models. In parallel of these experiments, our results may allow to propose a new analytical model, to make some possible improvements to the pool-scrubbing module of ASTEC, in particularly for transition regimes. This work would be included in the third year, in addition to the publications and writing of the thesis report.



## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Elouan LE FESSANT
Date du début de la thèse :	07/10/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SEREX/L2EC
Tuteur de thèse :	Anne-Cécile GREGOIRE
Directeur de thèse :	Jean-François PAUL/UCCS
Co-directrice de thèse :	Anne-Sophie MAMEDE/UCCS
École doctorale :	Université de Lille/Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN/OCDE (Projet ESTER)

Au cours d'un accident grave dans un réacteur nucléaire, les deux premières barrières de confinement sont rompues et de nombreux produits de fission volatiles (césium partiellement, iode, tellure, ...) ainsi que des éléments constitutifs du cœur du réacteur (bore, ...) sont relâchés et déposés dans le circuit primaire. Lors de l'accident de Fukushima Daiichi, des divergences entre les rejets mesurés à proximité du site et les codes de calcul ont été constatées [1]. Ces divergences peuvent en partie être attribuées à la revaporisation de certains produits de fission qui entraîne des rejets différés de plusieurs jours, voire semaines. Ce phénomène n'est pas pris en compte par les codes de calcul et a particulièrement été remarqué pour l'iode et le césium. Des études préliminaires ont déjà été menées par le passé sur les précurseurs possibles de cette remobilisation.

La thèse de Dorel OBADA [2014-2017, [2]] a étudié la remobilisation du Csl sous une atmosphère air/vapeur d'eau représentative d'un accident grave. Le banc expérimental développé a permis d'obtenir des informations sur les quantités d'iode moléculaire et de césium relâchées, ainsi que sur la cinétique de ces relâchements. Les résultats obtenus montrent l'importance de la composition de l'atmosphère de revaporisation sur la spéciation de l'iode revaporisé. Des travaux récents ont également mis en évidence une réactivité chimique du bore avec les dépôts de Csl.

Le sujet de ma thèse vise dans un premier temps à étendre cette étude à une atmosphère surchauffée et borée par le développement d'une nouvelle voie d'injection et des traitements thermiques. L'objectif est d'être en mesure d'évaluer l'impact du bore dans le flux gazeux sur la nature et la cinétique des rejets. Les premiers essais réalisés montrent un taux de revaporisation d'iode gazeux allant jusqu'à 70% [3].

Dans un second temps, la remobilisation de dépôts de tellure (dont un des isotopes est précurseur d'iode par décroissance radioactive) sera considérée. L'objectif est de caractériser et de quantifier les phénomènes impliqués, à travers :

- la création de dépôts à chaud ou à froid ;
- la mise en place de différents traitements thermiques ;
- le développement d'une procédure d'analyse (ICP-MS, XPS, TOF-SIMS,...).

Enfin une réflexion sera menée sur la revaporisation de l'iodure de césium et du tellure afin de déterminer les possibles interactions entre ces dépôts et leurs conséquences en situation d'accident grave.

[1] Katata G. et al, Atmospheric Chem. Phys. 15, 2015, p. 1029-1070.

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

[3] LE FESSANT Elouan, Rapport n°IRSN/2019-00547, Cadarache, 2019.

## ➤ Confinement Produits de Fission

## Dépôt / transfert (hors réacteurs)

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

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

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

**Gwenaël HOARAU** - Étude de l'évolution de la limite de détection et des faux positifs émis par les moniteurs de mesure de la contamination radioactive atmosphérique en situation de chantier de démantèlement.

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

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

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

## Sujet de la thèse :

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

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

Les chantiers de maintenance et d'assainissement dans les centrales nucléaires nécessitent la mise en place d'enceintes ventilées autour des zones contaminées pour limiter la propagation de la contamination vers l'extérieur, grâce au confinement dynamique. Toutefois, en raison des activités d'exploitation, il est possible que l'écoulement au droit d'une ouverture, nominale ou accidentelle, subisse des inversions locales et instationnaires conduisant à transporter la contamination à l'extérieur de l'enceinte, phénomène appelé rétrodiffusion.

Le premier objectif de ma thèse consiste à caractériser et à quantifier, sur une maquette existante, les phénomènes de rétrodiffusion gazeux et particulaires au niveau d'une ouverture créée sur des parois rigides et souples, ces résultats devant compléter ceux acquis par S. Kaissoun, sur la même maquette, pour un traceur gazeux et des parois rigides uniquement. Ainsi, l'instrumentation de la maquette existante permet la quantification des transferts locaux autour de l'ouverture, ainsi que des transferts globaux à l'extérieur de l'enceinte, grâce à une enveloppe collectrice spécialement dimensionnée. Le deuxième objectif consiste à comparer les courbes de rétrodiffusion gazeuse et particulaire acquises expérimentalement sur la maquette, avec celles issues de simulations numériques utilisant des modèles de turbulence hybrides (SAS ou DES) ; l'objectif à terme est de valider les résultats obtenus sur un sas ventilé à l'échelle réelle.

Nos essais préliminaires ont permis de quantifier simultanément, et localement autour de l'ouverture, les transferts gazeux et particulaires par des techniques de traçage, respectivement à l'hélium et à la fluorescéine sodée. La technique PIV (*Particle Image Velocimetry*) a permis, outre la caractérisation des profils de vitesse du jet perturbateur interne émis à contre-courant du jet d'entrée d'air, de nous renseigner sur les vitesses de déclenchement de la rétrodiffusion gazeuse pour différentes vitesses débitantes à l'ouverture. Par ailleurs, les simulations numériques ont montré la capacité des modèles de turbulence hybrides à reproduire les phénomènes de rétrodiffusion gazeuse, lesquels sont comparables à ceux obtenus par visualisation laser.

La technique PIV a également permis de vérifier que l'enveloppe ne perturbe pas les profils de vitesse à l'ouverture de la maquette. Cette dernière permettra de collecter, de manière globale et simultanée, les traceurs gazeux et particulaires émis à l'extérieur de l'enceinte. Elle sera mise en œuvre dans la suite de nos travaux et permettra de construire nos courbes de rétrodiffusion gazeuse et particulaire au cours de l'ensemble des scénarios envisagés, quelle que soit la nature de la paroi, souple ou rigide.

## 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

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

La thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme commun avec Orano sur des feux de solvants 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 participant au colmatage des filtres à Très Haute Efficacité dans les réseaux de ventilation. L'objectif de la thèse est de développer un dispositif multi-capteurs permettant la quantification 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 a été consacrée au développement et à la mise en place de préleveurs séquentiels 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) et sont de l'ordre de 10 g/m<sup>2</sup>. 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'étudier l'effet de la tension de polarisation sur la masse de suies déposée sur l'élément sensible du capteur résistif et d'établir une corrélation entre cette masse et la conductance délivrée par le capteur. La réponse de ce capteur correspond en effet à une mesure de conductance entre deux électrodes sur lesquelles des suies se déposent (Grondin *et al.*, 2015).

Enfin, un dispositif multi-capteurs temps-réel a été développé. Ce dispositif est basé sur le couplage d'un capteur résistif avec des capteurs de gaz, exploitant ainsi les quantités de gaz émises pendant la phase de régénération pour mesurer la masse déposée par unité de surface. Les capteurs de gaz ont été étalonnés et une première preuve de faisabilité a été démontrée.

La dernière étape de la thèse consistera à valider ce dispositif multi-capteurs lors d'expérimentations 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. Rapport IRSN.
- 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 :

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

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

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 Equipements et les Sondes d'Echantillonnage), a été mis en place.

Cette thèse s'inscrit dans le programme DEPART (DEPôt de PARTicules) et se décompose en trois phases. La première phase consiste à définir les essais, en priorisant les singularités géométriques à étudier (coudes, jonctions,...), ainsi que la métrologie. 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 simulations supplémentaires seront réalisées 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 permettant d'étudier le comportement des réseaux de ventilation en situation normale, dégradée ou accidentelle.

Aujourd'hui, la première phase est terminée, la deuxième est engagée. La caractérisation aérodynamique de l'installation a été faite en premier lieu. Une campagne de vélocimétrie par images de particules (PIV) est prévue pour compléter l'approche expérimentale et être comparée aux premières simulations, réalisées avec le logiciel ANSYS-Fluent, au niveau des gaines droites et des singularités.

Des expériences préliminaires ont été réalisées pour prendre en main le banc d'essai et vérifier la faisabilité et la répétabilité de la technique de mesure du dépôt. Ces expériences permettent, couplées aux simulations, de hiérarchiser l'importance des paramètres entrant en jeu dans l'aérodynamique et dans le dépôt des particules.

La grille d'essais a ainsi été établie en se focalisant sur le dépôt dans un coude du banc DIESE. La technique de mesure de dépôt utilisée est la spectrofluorimétrie, associée à des prélèvements en gaine et par frottis sur les parois des gaines. Il est prévu de réaliser des mesures suivant plusieurs débits et diamètres de particule, afin de pouvoir comparer les résultats à ceux de la littérature.

## Sujet de la thèse :

## Étude de l'évolution de la limite de détection et des faux positifs émis par les moniteurs de mesure de la contamination radioactive atmosphérique en situation 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/François GENSDARMES
Directeur de thèse :	Philippe CASSETTE - LNHB
École doctorale :	Université Paris-Saclay/PHENIICS
Financement de thèse :	IRSN/EDF

Dans le contexte de la maîtrise du confinement et des rejets liés aux opérations en chantier de démantèlement, une surveillance réglementaire de la contamination radioactive atmosphérique assure la radioprotection des travailleurs. Les moniteurs de surveillance de cette contamination radioactive atmosphérique (CAM) mesurent en continu et en temps réel les activités volumiques  $\alpha$  et  $\beta$  portées par les aérosols et émettent une alarme en cas de dépassement de seuils préalablement fixés. Le comportement de ces CAM est généralement évalué selon des normes internationales, lesquelles définissent en particulier les caractéristiques des aérosols d'essais. Toutefois, les conditions réelles d'utilisation des CAM peuvent être différentes des conditions d'essais normatives. En effet, l'utilisation en chantier de démantèlement met en avant des déclenchements intempestifs d'alarmes sans présence de radioactivité artificielle. Une campagne de mesure, menée par l'IRSN sur le chantier de démantèlement de la centrale nucléaire des Monts d'Arrée à Brennilis, montre la présence de grosses particules ( $> 3 \mu\text{m}$ ) et des variations rapides de la concentration particulaire non radioactive.

Pour alimenter la base des connaissances mobilisables de l'IRSN à la gestion des risques lors d'opérations de démantèlement, un dispositif expérimental a spécialement été conçu pour étudier le comportement d'un CAM en laboratoire dans des conditions de chantier de démantèlement. Il a tout d'abord été démontré que les fausses alarmes sont dues au fait que le taux de comptage constituant le bruit de fond, normalement pris en compte par l'algorithme de calcul du CAM, n'est pas compensé lorsque la concentration en particules dans l'air change rapidement.

La réponse du CAM a été caractérisée par rapport à de nombreuses atmosphères simulant les conditions des chantiers de démantèlement. Ainsi, une base de données exhaustive de relation entre masse d'aérosol prélevée et dégradation du spectre en énergie mesuré par le CAM a pu être créée. Une corrélation positive entre la masse de particules prélevée et le taux de comptage mesuré par le CAM dans la fenêtre dédiée aux radionucléides artificiels a été déterminée pour différentes dimensions d'aérosols. L'application de cette loi de corrélation permet une meilleure estimation du bruit de fond dans la fenêtre dédiée aux radionucléides artificiels. Des mesures complémentaires sont encore à réaliser pour confirmer l'utilisation de la base de données, via la loi de corrélation, dans des configurations non testées en laboratoire, afin de toujours permettre une mesure adaptée de l'activité tout en évitant les déclenchements intempestifs.

## 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

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

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

Pour répondre à ces problématiques de sûreté, j'ai adopté au cours de ma thèse des approches complémentaires basées sur des travaux expérimentaux et numériques. Dans un premier temps, un dispositif de prélèvement de poussières a été conçu et fabriqué afin de collecter des poussières déposées sur les parois d'un réacteur de fusion. L'appareil, nommé Duster Box, est constitué d'un canal aérodynamique dans lequel un flux d'air sous pression est créé. Ce canal est placé directement sur les surfaces que l'on souhaite analyser. Grâce à une caractérisation rigoureuse du flux d'air, des particules micrométriques peuvent être collectées directement sur des filtres sans aucune intervention mécanique. Une campagne de prélèvements in situ a ainsi été réalisée dans le tokamak WEST (CEA/IRFM). Cela a notamment permis d'identifier des particules de tungstène de forme sphérique de diamètres compris entre 5 et 50  $\mu\text{m}$ . Sur la base de ces observations, une poudre de tungstène a été sélectionnée en laboratoire afin de réaliser des mesures de forces d'adhésion à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM). Des distributions de forces d'adhésion pour des particules de tungstène de 2  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre sur des surfaces de tungstène avec différentes rugosités ont ainsi été obtenues.

La deuxième partie du travail concerne l'influence du rayonnement bêta issu du tritium sur les forces d'adhésion entre les particules et les surfaces en tungstène. Nous avons pu mesurer en laboratoire la capacité de rétention en tritium des poudres de tungstène et des activités spécifiques de 90 MBq.g<sup>-1</sup> et 280 MBq.g<sup>-1</sup> ont été obtenues pour deux tailles de particules, respectivement 17  $\mu\text{m}$  et 11,5  $\mu\text{m}$ . Compte tenu de ces activités en tritium, des simulations Monte-Carlo ont été effectuées afin d'estimer les taux d'auto-chargement radioactif et la charge électrique correspondante portée par les particules. Les résultats de ces simulations montrent que des forces électrostatiques peuvent se développer sur les particules pour atteindre les mêmes ordres de grandeur que les forces d'adhésion mesurées précédemment par AFM. Pour vérifier cette étude, des expériences de mise en suspension avec des particules de tungstène radioactives sont actuellement développées en boîte à gants. La faisabilité de telles expériences a été démontrée et les premiers résultats seront présentés.

## Sujet de la thèse :

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

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

L'installation ITER a pour finalité de démontrer la maîtrise de la production d'énergie par fusion thermonucléaire à partir d'un plasma de tritium-deutérium confiné par champ magnétique dans une chambre à vide. Les conditions très sévères qui résultent de la réaction de fusion, les critères liés à la stabilité de celle-ci et la nécessaire limitation de l'absorption du tritium (T) dans la paroi pour des considérations de sûreté limitent le choix des matériaux éligibles pour la première paroi de la couverture de la chambre à vide. De ces raisons, a découlé le choix du béryllium comme matériau de première paroi.

Du point de vue de l'analyse de sûreté, il est nécessaire d'étudier les interactions entre le tritium et le béryllium pour pouvoir évaluer l'efficacité des méthodes mises en place par l'exploitant pour : quantifier l'inventaire en tritium dans la chambre à vide pendant le fonctionnement normal, étuver la première paroi pour la désorption du tritium, et minimiser les rejets dans l'environnement (systèmes de filtration) en cas de perte de confinement de la chambre à vide.

L'objectif du travail de thèse est alors d'étudier l'interaction du tritium avec les défauts complexes du béryllium, qui pour certains, sont susceptibles de piéger une grande quantité de tritium. Les défauts retenus pour cette thèse sont les joints de grains et l'oxyde de béryllium (BeO). La formation de ce dernier est attendue en surface de la première paroi et plus généralement aux joints de grains, en raison de la grande affinité du béryllium pour l'oxygène (purification du plasma).

Cette thèse s'articule donc autour de deux axes : l'insertion et la diffusion du tritium dans BeO puis l'interaction du tritium aux joints de grains (ségrégation et diffusion) :

- À l'aide de simulations à l'échelle atomique (DFT), seront tout d'abord étudiées la solubilité du tritium dans BeO en identifiant les sites d'insertion, puis sa diffusion en évaluant les énergies d'activation entre les sites d'insertion stables. Ces données cinétiques seront ensuite utilisées dans un code de diffusion/réaction, pour modéliser le transport du tritium dans le métal et l'oxyde de béryllium.
- Concernant la modélisation des joints de grains, une analyse approfondie de leurs géométries sera réalisée en étudiant leurs énergies en fonction de leurs désorientations. Des simulations par dynamique moléculaire seront utilisées pour cette tâche. Enfin, la ségrégation et la diffusion de T sur les grains ainsi construits seront étudiées.

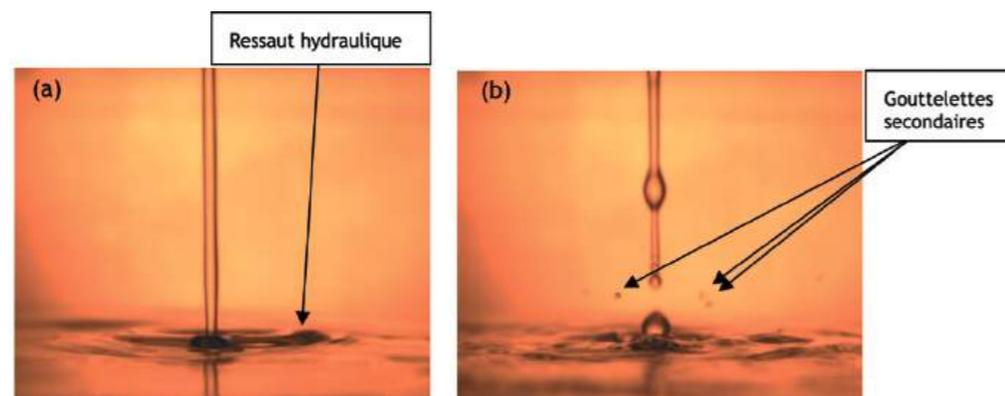
## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Modou MBAYE
Date du début de la thèse :	18/11/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SCA/LPMA
Tuteur de thèse :	Mamadou SOW
Directeur de thèse :	Christophe Josserand - LadHyX
École doctorale :	École Doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris
Financement de thèse :	IRSN

Le principal objectif de cette thèse est d'étudier expérimentalement et par des outils de calcul numérique la physique des différents processus qui aboutissent à la formation de gouttelettes secondaires et de résidus secs d'évaporation par l'impact d'un jet de liquide contaminé sur une surface. En effet, dans l'industrie nucléaire où une partie des matières radioactives est manipulée sous forme liquide, le déversement accidentel de liquides contaminés pourrait remettre en suspension une fraction de la radioactivité sous forme d'aérosols. Un risque récemment identifié par l'IRSN est l'éventuelle perte d'intégrité d'évaporateurs de solutions de produits de fission par corrosion de leurs parois. Ainsi, dans un scénario accidentel, il est indispensable de bien caractériser le terme source, i.e. la quantité d'aérosols générée, pour notamment bien définir les meilleurs moyens de détection précoce et d'estimation réaliste des éventuels rejets atmosphériques et mettre en place les mesures de radioprotection adéquates afin de limiter l'exposition des opérateurs et du public à la radioactivité.

Les expériences qui seront menées au LPMA dans une enceinte de type boîte à gant permettront de caractériser la dynamique de l'impact du jet à l'origine de la fragmentation du liquide et l'apparition du ressaut hydraulique et des instabilités par un dispositif d'imagerie par caméra rapide, figure (a). Les microgouttelettes évaporables, figure (b), responsables des transferts de contamination sous forme d'aérosol seront étudiées en termes de quantité (prélèvement sur filtre THE) et de distribution granulométrique (compteur optique de particules). Les simulations numériques en volumes finis qui seront conduites parallèlement au LadHyX permettront de reproduire la dynamique observée expérimentalement et d'avoir accès à des quantités difficilement mesurables expérimentalement (vitesses locales et pressions notamment).



(a) apparition du ressaut hydraulique,  
(b) fragmentation du jet et apparition de gouttelettes secondaires

## ► Confinement Produits de Fission

## Filtration

**Jonathan NUVOLI** - Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules appliquée à la filtration THE.

**Marie LECOQ** - Efficacité de filtration de médium métallique sous humidité.

**Maëva LELOIRE** - Capture de tétraoxyde de ruthénium et d'iode gazeux par des matériaux poreux : les Metal-Organic Framework.

**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.

## Sujet de la thèse :

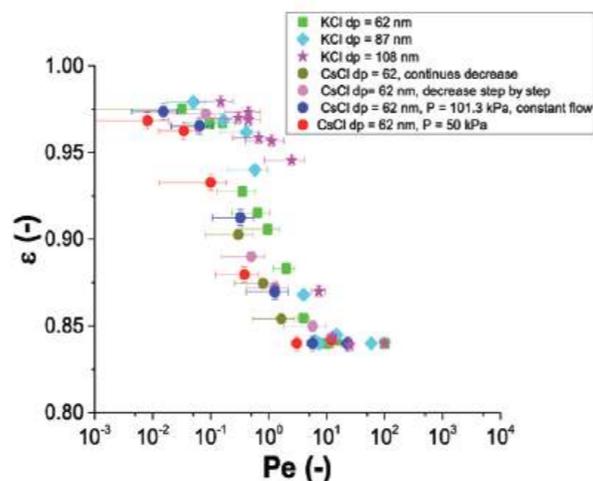
## Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules appliquée à la filtration THE

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

Le risque le plus probable au sein de toute installation industrielle est le risque incendie qui engendre un apport important de nanoparticules. Le rôle de l'IRSN est d'estimer les conséquences d'un tel incident, en particulier sur les équipements de confinement, au premier titre desquels se trouvent les filtres Très Haute Efficacité. En effet, lors d'un incendie, les filtres sont soumis à un colmatage important qui peut induire une perte de confinement. Les récents travaux menés à l'IRSN ont abouti au développement d'un modèle phénoménologique (Alilou 2018) permettant de prédire la perte de charge d'un filtre en fonction de ses propriétés et de celles de l'aérosol. Dans ce modèle, l'un des paramètres d'entrée, aujourd'hui prédit par des corrélations empiriques (Thomas *et al.*, 2014), est la porosité du dépôt de particules. De nombreux auteurs, *via* des simulations, ont proposé des valeurs de porosité pour des dépôts de nanoparticules formés par filtration et ont montré, pour un aérosol donné, une dépendance de la porosité en fonction du nombre de Péclet (rapport des mécanismes de transport par convection et diffusion), illustrée par une courbe en S inversé.

Ce travail vise à étudier expérimentalement et de manière systématique la porosité d'un dépôt de nanoparticules, par le biais d'expériences analytiques avec une production de particules contrôlée et couvrant une large gamme de nombres de variation du nombre de Péclet. Le but est de proposer une corrélation phénoménologique de la porosité.

L'influence de la masse volumique, du diamètre de particule, de la vitesse de filtration et du libre parcours moyen de l'aérosol sur un dépôt de particules sphériques est étudiée individuellement. La figure résume ces résultats et montrent que le nombre de Péclet n'est pas une métrique suffisante pour exprimer la porosité d'un dépôt. La prise en compte de la morphologie des particules est ensuite étudiée et montre également son influence, à travers la dimension fractale, le nombre et le diamètre des particules primaires. A partir des résultats expérimentaux, un modèle physique est proposé et validé.



Évolution de la porosité d'un dépôt de nanoparticules sphériques en fonction du nombre de Péclet

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

## Sujet de la thèse :

## Efficacité de filtration de médium métallique sous humidité

Doctorant : Marie LECOQ  
 Date du début de la thèse : 01/10/2019  
 Laboratoire : PSN-RES/SCA/LECEV  
 Tuteur de thèse : Soleiman BOURROUS  
 Directeur de thèse : Dominique THOMAS - LRGP  
 École doctorale : Université de Lorraine/Sciences et Ingénieries des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie  
 Financement de thèse : IRSN/Novintec

Dans les installations industrielles susceptibles de contenir de la matière dangereuse, le confinement aéraulique est assuré par des filtres à très haute efficacité (THE) composés de fibres de verre. Certains scénarios accidentels conduisent au dégagement, dans l'installation, de liquide sous forme de gouttelettes en suspension (aérosols liquides). Dans ce cas de figure, la présence d'espèces liquides pourrait affecter les performances des filtres THE en réduisant significativement leur résistance mécanique et leur capacité à retenir les contaminants aéroportés.

Pour pallier ce problème, une des solutions envisagées est d'utiliser un préfiltre métallique (plus résistant mécaniquement mais moins efficace), pour protéger le filtre THE. A l'heure actuelle, peu d'études se portent sur la filtration d'aérosols liquides par des filtres métalliques. Le comportement de ces filtres vis-à-vis des aérosols liquides dépend de plusieurs paramètres, tels que la viscosité et la masse volumique du liquide, le diamètre des fibres, la compacité et la mouillabilité du filtre.

C'est pourquoi, dans un premier temps, nous caractériserons la structure des filtres métalliques (à l'aide d'un programme d'analyse d'images obtenues par microscopie électronique), ainsi que les propriétés du liquide. Dans un second temps, nous caractériserons l'interaction entre une fibre et le liquide. Pour cela, nous disposons de fibres (identiques à celles composant les filtres métalliques) sur lesquelles nous déposerons des gouttes de liquide (sur une ou plusieurs fibres) et nous observerons les angles de contact (figure) et les films liquides formés entre les fibres.

L'aérosol liquide utilisé sera composé de résine thermodurcissable afin que le liquide polymérise entre les fibres au sein du filtre durant les essais. Cela permettra de lier la répartition de liquide au sein du filtre (qui conditionne la perte de charge et le transfert de polluant à travers le filtre) aux caractéristiques mesurées précédemment. L'ensemble des

mesures réalisées à l'échelle microscopique et à l'échelle du filtre permettra d'aboutir à des corrélations ou à des modèles de perte de charge et de transfert de contamination en fonction de la masse de liquide accumulé et des conditions de filtration.



Goutte de glycérol sur une fibre métallique en acier inoxydable, de 3 μm de diamètre.

## Sujet de la thèse :

Capture de tétraoxyde de ruthénium et d'iode gazeux par des matériaux poreux :  
les Metal-Organic Framework

Docteurant :	Maëva LELOIRE
Date du début de la thèse :	15/11/2017
Laboratoire :	PSN-RES/SEREX/L2EC-UCCS
Tuteur de thèse :	Philippe NERISSON
Directeur de thèse :	Thierry LOISEAU - UCCS
Co-directeur :	Christophe VOLKRINGER - UCCS
École doctorale :	Université de Lille/Sciences de la matière du rayonnement et de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN/Région Hauts-de-France

Certains isotopes de produits de fission (PF) tels que l'iode ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) et le ruthénium ( $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ) présentent un risque radiologique important en cas de rejets dans l'environnement. Après un accident nucléaire, ces éléments peuvent être rapidement disséminés car ils génèrent des espèces très volatiles comme l'iode moléculaire ( $\text{I}_2$ ) ou le tétraoxyde de ruthénium ( $\text{RuO}_4$ ). Ainsi, afin de prévenir les rejets accidentels de ces PF, l'UCCS et l'IRSN ont démarré des travaux de recherche sur des dispositifs innovants de piégeage ou mitigation du  $\text{RuO}_4$  et d' $\text{I}_2$ . En effet, depuis plusieurs années sont apparus de nouveaux types de matériaux poreux, composés de cations métalliques et de ligands organiques, appelés Metal-Organic Framework (MOF). Les MOFs bénéficient d'un intérêt scientifique fortement croissant ces dernières années. Cette problématique apporte donc des éléments de réponse pour mieux caractériser le transfert de la contamination dans une installation et vers l'environnement ainsi que l'efficacité des dispositifs de filtration ou d'épuration dédiés à réduire les rejets en fonctionnement normal et accidentel.

Ce travail de thèse consiste en une étude expérimentale sur la capture de  $\text{RuO}_4$  par des MOFs. Un dispositif générant du ruthénium sous forme de  $\text{RuO}_4$  a été développé à l'IRSN au laboratoire L2EC à Cadarache (banc SAFARI). Les capacités de piégeage du  $\text{RuO}_4$  par des MOFs synthétisés à l'UCCS ont été évaluées sur ce banc d'essais. Les premiers résultats obtenus à 50°C en gaz sec ont révélé des capacités de captures satisfaisantes avec des facteurs de décontamination autour de 200 pour le MOF-808-(Zr). Les analyses par microscopie électronique en transmission ont montré une insertion de ruthénium à hauteur de 33% en masse à l'intérieur de ce MOF. Ces résultats prometteurs permettent d'envisager de nouveaux essais sur la capture de  $\text{RuO}_4$  en conditions plus représentatives (T=90°C et 20% d'humidité relative).

En parallèle de ces travaux, une étude sur la capture de l'iode moléculaire a été réalisée, un dispositif de filtration a été développé au laboratoire UCCS à Lille. Les résultats montrent une nette amélioration de la capture de l'iode par des MOFs fonctionnalisés par des groupements amino (-NH<sub>2</sub>). L'un d'eux a été sélectionné et mis en forme en sphères de diamètres compris entre 0,5 et 2,0 mm, afin qu'il soit testé sur l'installation EPICUR, qui permet d'évaluer la pérennité du piégeage de l'iode au sein des matériaux en conditions proches des conditions accidentelles (irradiations gamma, température et humidité relative).



## 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

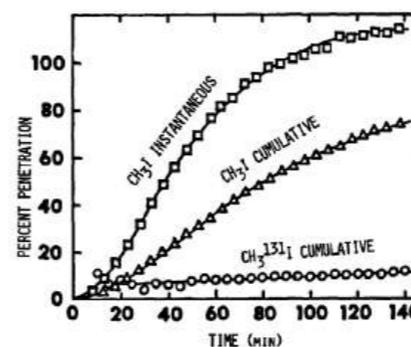
Docteurant :	Hantao LIN
Date du début de la thèse :	02/10/2018
Laboratoire :	PSN-RES/SCA/LECEV
Tuteur de thèse :	Céline MONSANGANT-LOUVET
Directeur de thèse :	Denis DOIZI - CEA
École doctorale :	Sorbonne Université Chimie Physique et Chimie Analytique de Paris-Centre
Financement de thèse :	IRSN

La nécessité de limiter les rejets des substances radioactives constitue un enjeu fort dans le domaine de la sûreté des installations nucléaires (que ce soit en exploitation normale ou en situation accidentelle) et les radio-isotopes de l'iode représentent une part importante de l'impact sanitaire en cas de rejet, surtout pour l'iode 131 (forte radio-toxicité). C'est pourquoi, la plupart des installations nucléaires comportent dans leurs réseaux de ventilation des pièges à iode. Ces derniers sont principalement constitués de charbons actifs imprégnés (KI et TEDA) et le test de leur efficacité, souvent annuel, à l'iodure de méthyle  $\text{CH}_3\text{I}$  radioactif, constitue la majeure partie des rejets à l'environnement de certaines installations.

Ce travail de recherche est consacré à la compréhension et à la quantification du mécanisme d'échange isotopique [1] permettant la rétention de l'iode dans les charbons actifs en complément des mécanismes d'adsorption. Dans ce cadre, deux bancs d'essais ont été mis en place pour déterminer des courbes de percée de l'iodure de méthyle (courbes représentant la pénétration de l'iode au cours du temps au travers de l'absorbant, cf. Figure), l'un en iode inactif et l'autre en iode radioactif ( $\text{CH}_3\text{I}$  marqué à l'iode 131). Les conditions opérationnelles sont identiques pour ces deux systèmes.

Les premières expériences ont permis la mesure de coefficients d'épuration à l'iode radioactif sur un ensemble de charbons imprégnés à différentes concentrations en KI et TEDA, afin de mieux comprendre l'effet de l'imprégnation sur l'efficacité instantanée. Dans le même temps, la caractérisation de la surface spécifique de ces charbons actifs a été effectuée par mesure BET et les volumes de pores ont pu être calculés.

En parallèle, des mesures de courbe de percée en iode inactif, dans différentes conditions de température et d'humidité relative et pour différents types de charbons actifs, ont été effectuées. Quelques tendances peuvent être extraites de ces courbes. Notamment, la capacité d'adsorption des charbons actifs (non imprégné et KI-imprégné) diminue avec la présence de l'eau.



Comparaison de courbes de percée pour un même charbon actif standard, en iode radioactif et en iode non radioactif [1]

[1] G. O. Wood and F. O. Valdez, "Nonradiometric and radiometric testing of radioiodine sorbents using methyl iodide", Los Alamos Scientific Lab., NM (USA), 1980

## ➤ Confinement Produits de Fission

Confinement statique

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

## Sujet de la thèse :

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

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

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

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

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

Afin de compléter les résultats expérimentaux, une étude numérique a été proposée pour prédire le comportement et la capacité des fixations sous différents types de chargement. Les calculs seront réalisés à l'aide d'un modèle d'éléments discrets, qui permet de représenter explicitement les fissures induites par un séisme et les mécanismes associés (initiation, propagation et fermeture de la fissure, frottement...). Une nouvelle procédure pour faciliter le maillage, prenant en compte des géométries complexes, a été mise au point. Ensuite, des modélisations numériques bidimensionnelles et tridimensionnelles ont été réalisées sur des goujons à tête hexagonale percés dans le béton sous chargement statique. Les résultats numériques obtenus ont été comparés avec les données expérimentales. La discussion porte actuellement sur la capacité et les limitations d'un modèle numérique 2D, pour prédire le comportement des ancrages et la nécessité de passer à une modélisation 3D.

### ► Incendie et explosion

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

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

**Corentin NOUGIER** - Étude de la dégradation de matériaux solides en feu soumis à des régimes de sous-oxygénation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé.

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

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

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

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

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

## Sujet de la thèse :

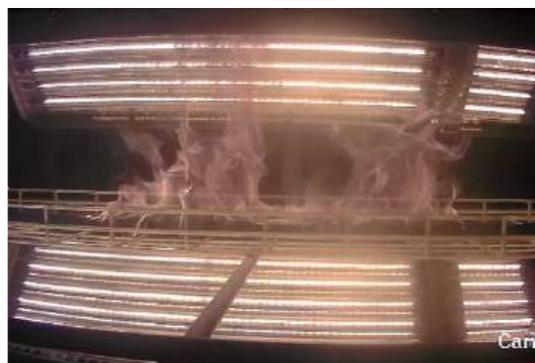
Étude expérimentale et analytique de la propagation du feu  
sur un chemin de câbles électriques

Docteurant :	Romain MEINIER
Date du début de la thèse :	02/10/2017
Laboratoire :	PSN-RES/SA2I/LEF
Tuteur de thèse :	Pascal ZAVALTA
Directeur de thèse :	Laurent FERRY – IMT Mines Alès/C2MA
École doctorale :	IMT Mines Alès/Sciences Chimiques Balard
Financement de thèse :	IRSN/IMT Mines Alès/EDF

Environ soixante-dix départs de feux ou incendies impliquant des câbles électriques ont été recensés depuis 1990 dans les installations nucléaires de douze pays membres de l'OCDE. Les feux de câbles électriques constituent ainsi l'un des principaux risques d'incendie sur les installations nucléaires. Compte tenu du grand nombre de locaux sur les installations, les analyses de sûreté incendie ont besoin dans un premier temps de disposer d'outils opérationnels permettant une évaluation rapide et conservative du risque incendie. Ces outils doivent en particulier disposer de modèles simplifiés capables de prédire l'inflammation et la propagation du feu sur des chemins de câbles électriques. De tels modèles ont été proposés par la communauté internationale pour des matériaux académiques (ex. plaque de PMMA) et de petite taille. L'objectif de ces travaux de recherche est d'étudier la validité de ces modèles à moyenne échelle et pour des objets complexes que constituent des chemins de câbles électriques. Ces travaux s'inscrivent alors dans une démarche multi-échelle.

Dans un premier temps, les lois d'inflammation de deux types de câbles électriques (avec ou sans halogène) couramment rencontrés dans les installations nucléaires ont été étudiées à petite échelle (cône calorimètre). La deuxième partie de ces travaux de recherche étudie les modèles d'inflammation et de propagation à l'échelle du chemin de câbles à l'aide du nouveau dispositif expérimental CISCCO (*Cable Ignition and Spreading under Controlled Conditions*). Ce dispositif permet d'imposer, à l'aide de panneaux rayonnants, des flux thermiques sur un chemin de câbles réel afin de l'enflammer et de propager le feu le long de ce dernier (voir figure).

Les essais réalisés révèlent que les temps d'inflammation sont en accord avec le modèle de Quintiere<sup>[1]</sup> pour les câbles sans halogène. Par contre, pour les câbles halogénés ce modèle sous-estime le délai d'inflammation compte tenu de la formation importante de charbonnement avant inflammation. Ce charbonnement a été caractérisé par photogrammétrie ce qui a permis de proposer une correction au modèle utilisé. Les essais d'inflammation, réalisés avec le nouveau dispositif (i.e. à moyenne échelle), confirment les résultats obtenus à petite échelle. Les premiers essais d'inflammation et de propagation à l'aide des deux ensembles de panneaux rayonnants ont validé les fonctionnalités du dispositif CISCCO.



Essai de propagation  
dans CISCCO  
(vue horizontale)

[1] J. G. Quintiere,  
*Fundamentals of Fire Phenomena*. 2006

## Sujet de la thèse :

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

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

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

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

La première étape de la thèse a été de développer un modèle SGE pour les écoulements non réactifs compressibles. Le système d'équations régissant l'écoulement est résolu à l'aide un schéma explicite en temps de type volumes finis à mailles décalées. Le schéma satisfait au niveau discret une identité d'énergie cinétique. Cette propriété garantit d'une part la stabilité du schéma mais aussi que les transferts énergétiques entre petites et grandes échelles ne soient pas négligeables devant des résidus de dissipation numérique.

La deuxième étape de la thèse a consisté dans le développement d'un nouveau modèle de combustion adapté à la méthode SGE : le modèle de flamme épaissie. Cette approche consiste à épaissir artificiellement le front de flamme permettant ainsi une description fine du front en s'affranchissant de l'utilisation d'un modèle de sous-maille dédié. Un modèle d'efficacité est aussi utilisé afin de simuler le plissement de sous-maille, perdu dans l'opération d'épaississement.

Ces développements ont été implantés dans CALIF<sup>3</sup>S-P<sup>2</sup>REMICS et validés sur des cas tests de la littérature.

La prochaine étape sera de les appliquer à une configuration d'intérêt (flammes accélérées par des obstacles). Une extension du modèle aux flammes partiellement pré-mélangées est également envisagée.

## Sujet de la thèse :

**Étude de la dégradation de matériaux solides en feu soumis à des régimes de sous-oxygénation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé**

Doctorant :	Corentin NOUGIER
Date du début de la thèse :	07/10/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SA2I/LEF
Tuteur de thèse :	Mickaël COUTIN
Directeur de thèse :	Thomas ROGAUME - Pprime
École doctorale :	Université de Poitiers Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique
Financement de thèse :	IRSN/NRA

Un incendie qui se déclare dans une installation nucléaire, dont une des caractéristiques est d'être fortement confinée et ventilée mécaniquement, conduit très souvent à des feux sous-oxygénés. Les travaux de recherche entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat visent à obtenir une compréhension plus fine de l'effet de la sous-oxygénation sur le processus de dégradation de matériaux en feu. Ils s'inscrivent dans le cadre du programme de recherche FIGARO sur les feux de boîtes à gants (BàG) et la mise en suspension de radionucléides impliqués dans ces feux. Ainsi, deux matériaux combustibles constitutifs des BàG sont à considérer : le polycarbonate, utilisé pour les panneaux de confinement de la BàG, et le Kyowaglas (matrice de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) dopée en particules de plomb), utilisé pour les panneaux de protection biologiques. Toutefois, la combustion du Kyowaglas étant problématique à cause de la présence de plomb dans sa composition, il sera remplacé, dans un premier temps, par du PMMA.

Le dispositif expérimental à moyenne échelle CADUCEE, calorimètre à atmosphère contrôlé de l'IRSN, sera utilisé pour la réalisation des essais. Les échantillons de différentes tailles y seront testés dans des configurations horizontale et verticale, et pour des concentrations en oxygène variant de 21 %vol. à un niveau bas, conduisant à l'extinction du foyer. Une diminution de la concentration en oxygène du mélange oxydant induit une diminution du flux de chaleur provenant de la flamme vers la surface combustible, ce qui, en retour, entraîne une diminution du débit de pyrolyse jusqu'à une valeur critique menant à l'extinction. Durant cette thèse, le calorimètre CADUCEE sera modifié par l'ajout d'une source chauffante par rayonnement, permettant d'apporter une quantité de chaleur supplémentaire au matériau et de réduire ainsi la limite de concentration d'oxygène menant à l'extinction. Des dispositifs d'essais à petite échelle de l'institut Pprime pourront être utilisés afin de caractériser plus finement certains phénomènes rencontrés à moyenne échelle. Ces moyens complémentaires permettront également de déterminer des propriétés thermiques, physiques et chimiques nécessaires aux modèles physiques. Les résultats expérimentaux obtenus lors de cette thèse seront utilisés, au sein du programme FIGARO, pour valider, et le cas échéant enrichir par de nouvelles lois de comportement, le code de calcul incendie ISIS.

## Sujet de la thèse :

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

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

L'étude des écoulements turbulents intéresse un grand nombre de domaines pour des problématiques de sûreté dans des situations aussi bien naturelles qu'industrielles (pollution atmosphérique associée aux rejets des cheminées, ...). Dans le cadre des études de sûreté menées par l'IRSN, une problématique importante concerne le risque de déflagration dans les locaux où une source d'hydrogène est présente ainsi que dans l'enceinte de confinement lors d'un accident de fusion du cœur. Dans ces situations, le mélange turbulent des différentes espèces gazeuses joue un rôle déterminant sur les niveaux de concentration d'hydrogène et donc sur le risque d'inflammation et d'explosion du mélange gazeux. Par ailleurs, le traitement des déflagrations en milieu encombré nécessite une évaluation suffisamment précise du niveau d'énergie cinétique turbulente pour prédire de manière quantitative les vitesses de flamme et les surpressions correspondantes. Ce niveau étant piloté en majeure partie par la production d'énergie cinétique turbulente en proche paroi, une réduction des incertitudes associées à la prédiction des vitesses de flamme nécessite une description suffisamment précise de la couche limite.

L'objectif de cette thèse s'inscrit dans un contexte plus général d'amélioration des prévisions des modèles de turbulence pour l'ensemble des applications de la plate-forme CALIF3S développée à l'IRSN (dispersion, déflagration, incendie, transport de polluant,...). Il s'agit en particulier de poursuivre les développements menés pour les approches dites hybrides RANS/LES. Ces approches connaissent un intérêt grandissant en améliorant les performances prédictives des approches RANS tout en réduisant le coût des approches LES. Pour atteindre les objectifs fixés, la thèse s'articule autour de trois axes.

Le premier axe consiste à développer une méthode performante de génération de fluctuations turbulentes aussi physiquement réalistes que possible afin de décrire le plus correctement possible les zones de transition de type RANS/LES au travers d'une méthode de forçage volumique.

Dans un deuxième temps, une revue des lois de parois adaptatives proposées dans la littérature sera menée en s'attachant à leur formulation dans un contexte de méthode de décomposition de domaine. La validation du modèle, dans un contexte RANS puis hybride, sera menée sur des cas académiques représentatifs des situations d'intérêt pour lesquels on dispose de données de référence.

Enfin, la troisième année sera consacrée à la mise en œuvre de l'approche hybride avec forçage sur un cas représentatif de fuite d'hydrogène dans un local ventilé. Il s'agira en particulier d'estimer les apports d'une approche hybride sur certaines configurations d'écoulement du programme expérimental CARDAMOMETTE mené à l'IRSN.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Linkai WEI
Date du début de la thèse :	14/10/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SAG/LEPC
Tuteur de thèse :	Renaud MEIGNEN
Directeur de thèse :	Nicolas RIMBERT – LEMTA ENSEM
École doctorale :	Université de Lorraine/Sciences et Ingénieries des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie
Financement de thèse :	IRSN

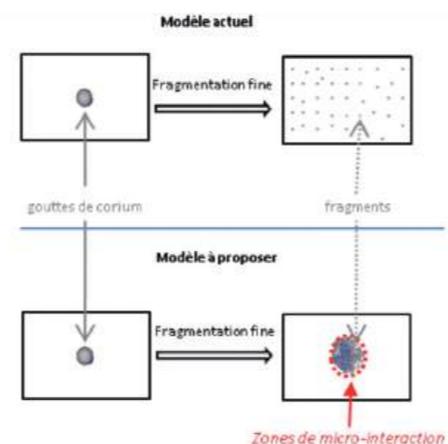
L'explosion de vapeur peut survenir au cours d'un accident grave lors de la mise en contact du corium et de l'eau de refroidissement. Elle est une menace pour l'intégrité de confinement et le rejet de produits radioactifs dans l'atmosphère. Ce phénomène est analogue à une détonation. L'explosion est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

Le logiciel MC3D, développé par l'IRSN, est reconnu comme référence pour l'évaluation de ce phénomène. Cependant, les mécanismes fins des processus couplés de fragmentation fine et de pressurisation sont incertains et ont été l'objet de travaux récents dans le cadre du projet RSNR-ICE. Les travaux réalisés ont conduit à dégager une compréhension accrue de la phénoménologie générale.

- En premier lieu, les simulations numériques fines de transferts thermiques de gouttes de corium vers l'eau, dans des conditions représentatives (2500 K et très hautes pressions), ont confirmé le principe d'ébullition en film, même en conditions supercritiques, ce qui est cohérent avec le modèle MC3D actuel.
- Cependant, il est apparu que les processus de fragmentation semblent, sous certaines conditions, se réaliser sans qu'il n'y ait une dispersion importante des fragments dans l'eau, contrairement à ce que présuppose le modèle MC3D actuel pour la fragmentation fine.

L'environnement local des fragments est donc mal pris en compte par l'actuel modèle. L'objectif de la thèse est de proposer une révision de la modélisation de MC3D reprenant les conclusions précédentes, c'est-à-dire combinant le principe actuel d'ébullition directe et d'interaction corium-eau localisée dans un volume restreint autour des gouttes et fragments de corium (concept de micro-interaction).

Le travail débutera par une bibliographie approfondie du phénomène d'explosion et une analyse détaillée du comportement de l'actuel modèle. Les travaux du projet ICE seront ensuite repris pour être confirmés. Il s'agira de réaliser des simulations DNS de la fragmentation (code Basilisk) et des transferts thermiques (MC3D-MESO avec prise en compte de l'oxydation). Cela conduira à des propositions de spécifications physiques détaillées du modèle. Avec le support de l'équipe de développement du logiciel MC3D, le modèle sera ensuite développé et validé dans une version autonome du logiciel MC3D.



## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Aubin BRUNEL
Date du début de la thèse :	27/10/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SA2I/LIE
Tuteur de thèse :	Jean-Claude LATCHÉ
Directeur de thèse :	Raphaèle HERBIN - I2M, CNRS
École doctorale :	Aix-Marseille Université Mathématiques et Informatique de Marseille
Financement de thèse :	IRSN

Dans les simulations effectuées pour les études de sûreté nucléaire, les écoulements sont décrits la plupart du temps par des équations de bilan, et notamment les équations de Navier-Stokes constituées des bilans de masse et de quantité de mouvement, où les termes de convection sont dominants, et ce quelle que soit la modélisation de la turbulence choisie. C'est le cas, par exemple, pour la simulation des incendies dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement ou pour la modélisation des déflagrations turbulentes, phénomènes décrits par des logiciels basés sur la librairie de composants pour la mécanique des fluides CALIF<sup>3</sup>S, développée à l'IRSN.

L'objectif de la thèse est de développer un ou des opérateurs discrets de convection performants pour de tels écoulements dans des domaines complexes ; ces opérateurs seront mis en œuvre pour des écoulements incompressibles, à faible nombre de Mach ou compressibles (en incluant les équations d'Euler). La discrétisation de l'opérateur de convection sera de type volume finie, et doit être à la fois stable et précise sur des maillages généraux. En outre, l'approximation en espace utilisée dans CALIF<sup>3</sup>S est une discrétisation à mailles décalées : les inconnues scalaires (pression, masse volumique) sont associées aux cellules du maillage alors que la vitesse est associée aux faces des cellules (ou, de manière équivalente, à un maillage dit dual, constitué de volumes de contrôle centrés sur les centres des faces). Deux opérateurs de convection discrets sont donc mis en œuvre, le premier basé sur le maillage initial (ou primal) et le second basé sur le maillage dual.

Les maillages abordés devront prendre en compte des volumes de contrôles pyramidaux ou prismatiques. Ces types de cellules sont assez couramment utilisés dans les maillages industriels. Des mailles prismatiques sont obtenues lorsque l'on construit un maillage par extrusion d'un maillage 2D d'une surface plane générale. Les volumes de contrôle pyramidaux, du fait qu'ils possèdent des faces quadrangulaires et triangulaires, permettent de faire coexister tétraèdres et hexaèdres dans un même maillage, ce qui est parfois nécessaire à certains maillages 3D pour traiter une géométrie complexe. Ces volumes de contrôle ne sont pas à ce jour traités dans CALIF<sup>3</sup>S.

L'opérateur de convection du premier ordre est standard sur les mailles primales ; une variante plus précise pourra être obtenue par les techniques de type MUSCL opérantes en géométrie quelconque. L'opérateur sur maillage dual est plus difficile à obtenir, compte-tenu des contraintes de cohérence avec l'opérateur primal.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Laura VASTIER
Date du début de la thèse :	01/12/2019
Laboratoire :	PSN-RES/SAG/B2EGR
Tuteur de thèse :	Ahmed BENTAIB
Directeur de thèse :	Nabiha CHAUMEIX, ICARE – CNRS Orléans
École doctorale :	Satoshi Kadowaki - Nagaoka University of Technology (Japon)
Financement de thèse :	IRSN/Région Centre Val de Loire

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

Cette thèse a pour vocation de compléter la connaissance concernant la propagation de flamme, générée par la combustion de H<sub>2</sub> et CO, dans des conditions représentatives de la phase tardive d'un accident grave. En effet, la revue des données existantes, effectuée dans le cadre du projet NUGENIA/SAMHYCO-NET, a fait apparaître un manque de connaissances dans :

- La détermination des limites d'inflammabilité du mélange composé de H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, et CO<sub>2</sub> en tenant compte de l'impact de la température et de la pression ainsi que celui de la teneur en oxygène ;
- La détermination des vitesses de flammes laminaires et turbulentes dans ces conditions ;
- Les critères d'accélération et d'étouffement de flammes dans ces conditions en considérant des mélanges homogènes et stratifiés. À ce propos, les résultats obtenus dans le cadre du programme RSNR/MITHYGENE montrent un effet significatif de la température initiale sur l'accélération de flammes.

Pour ce faire, la thèse se déroulera comme suit :

- Durant la première année, une analyse bibliographique sera réalisée ; elle permettra notamment de définir la matrice des essais qui représentent au mieux l'atmosphère d'une enceinte de confinement en phase tardive d'un accident de grave et d'élaborer les protocoles expérimentaux nécessaires pour la réalisation des essais ;
- La deuxième année sera consacrée à la détermination des limites d'inflammabilité et des vitesses de flammes dans des mélanges composés de H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, et CO<sub>2</sub> en tenant compte de l'impact de la température et de la pression ainsi que celui de la teneur en oxygène. Pour ce faire, des bombes sphériques de 56 et 93 litres respectivement seront utilisées ;
- La troisième année sera dédiée à l'étude de la propagation de flammes en milieu composé de H<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O en tenant compte de l'impact de la température et de la pression initiales. A cet effet, l'installation ENACCEF2 sera utilisée.

## Sujet de la thèse :

**Étude de l'empoisonnement des recombineurs**

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

During a severe accident in a nuclear power plant, a large amount of hydrogen can be produced during reactor core degradation phase and molten core concrete interaction, and form an explosive gas mixture in the reactor building. As highlighted by the Fukushima Daïchi accident, the dynamic pressure loads resulting from hydrogen combustion may threaten safety-relevant systems and the reactor containment, which is the last barrier to prevent radioactive releases to the environment. For mitigating hydrogen risk, French nuclear power plants are equipped with passive autocatalytic recombiners (PARs). These devices remove hydrogen from the containment by an exothermic reaction between hydrogen and oxygen on catalytic surfaces. PARs sizing is based on the assumption that they are always fully operational. However, they can be exposed, in normal operation and accidental conditions, to different chemical products or atmospheric pollutants (dust, oils, solvents, fire products, etc.) that may lead to catalyst deactivation. Other chemical reactions might occur on the catalyst surface, like the chemical interaction with carbon monoxide generated during molten core concrete interaction after reactor pressure vessel rupture. PARs poisoning is a safety concern since it can result in start-up delay and in loss of the recombination efficiency, increasing the hydrogen explosion risk.

This PhD thesis aims to fill the gap of knowledge concerning PARs deactivation in normal operation and accidental conditions. For this purpose, experiments will be performed on the REKO platform at Jülich, Germany. The experimental facilities allow to study several aspects of PARs operation. The SPARK code, a dedicated tool developed by IRSN for catalytic reactor-type applications, will be used to analyse the experiments. The results and the knowledge gained will be used to enhance the existing models already implemented.

The first year will be dedicated to a bibliographic analysis that will allow to define the matrix of tests to be performed. During the second year, experiments will be carried out at Jülich. The third year will be devoted to the analysis of the experimental results using the SPARK code. Along with the bibliographic research, first calculations based on reference tests used for the SPARK code validation are already being performed in order to get started with the code and to achieve deep understanding.

## ► Vieillessement des structures et équipements des installations

### Béton et ouvrages de génie civil

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

**Abdellatif AMMAR** - Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif du béton sur le développement des réactions de gonflement interne.

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

**Joffrey LHONNEUR** - Approche par changement d'échelles du vieillissement des bétons. Expérimentations et simulations numériques.

**Kathleen PELE** - Modélisation de la prédiction de fissures sur la base de descripteurs morphologiques locaux : application à la génération de microstructures équivalentes dans les études du vieillissement des matériaux cimentaires.

### Travaux référencés dans la démarche de recherche

« Stockage géologique profond » : pages 45 à 47

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

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

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

## Sujet de la thèse :

## Proposition d'un indicateur de durabilité pour la détection des réactions de gonflement interne dans le béton

Doctorant :	Arthur PICHELIN
Date du début de la thèse :	03/10/2017
Laboratoire :	PSN-EXP/SES/LMPAS - LMDC
Tuteur de thèse :	Georges NAHAS
Directeur de thèse :	Myriam CARCASSÈS - LMDC
École doctorale :	Université de Toulouse/Mécanique, Energétique, Génie Civil, Procédé
Financement de thèse :	IRSN

L'objectif de la thèse, en collaboration avec le LMDC (Toulouse) est de proposer un indicateur de durabilité pour évaluer l'état de développement des Réactions de Gonflement Interne (RGI) dans le béton pour les ouvrages existants. Ces réactions font partie des pathologies du béton, elles 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 :

1. La recherche des corrélations entre les évolutions des différents paramètres physiques en fonction de l'état de développement des pathologies.
2. 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 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 à l'eau, perméabilité au gaz, diffusivité aux ions, résistivité électrique), elles sont étudiées sur des éprouvettes de laboratoire (suivant les normes d'essais).

Les résultats obtenus sur les éprouvettes constituées de quatre formulations différentes développant la RSI, la RAG et le couplage des pathologies sont prometteurs. En effet, certains de ces essais comme la mesure du module statique, la résistivité électrique ou encore la perméabilité à l'air, très facile à mesurer sur des éprouvettes, montrent une sensibilité importante vis-à-vis de la propagation de la microfissuration générée par le développement des pathologies. La transposition de ces essais sur les blocs du projet ODOBA à l'échelle d'un ouvrage permettra de confirmer la tendance des résultats obtenus en laboratoire. 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 en vue de la prolongation de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires.

## Sujet de la thèse :

## Évaluation de l'impact d'un échauffement tardif du béton sur le développement des réactions de gonflement interne

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

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 des 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 » en contraste avec 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. 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 premiers ont été utilisés 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 à l'IFSTTAR<sup>i</sup>, sur des pâtes de ciment fabriquée avec les trois types de ciment concernés. Différentes techniques de caractérisation<sup>ii</sup> ont été employées afin d'étudier la microstructure et l'évolution des compositions minéralogiques sur des éprouvettes traitées suivant selon des conditions simulant des scénarios accidentels. Les résultats montrent une variation importante de la microstructure en échauffant : un réseau de fissuration et de porosité plus massif avec une dégradation des phases aluminates dès les premiers jours du traitement. La deuxième partie a été réalisée sur des éprouvettes en béton à l'Université de Sherbrooke au Canada. Les résultats montrent une évolution négligeable des performances mécaniques contre une dégradation importante des propriétés de transfert, traduite par des gonflements dans certains type des bétons dépendamment de sa composition chimique et de ses propriétés hydriques. Un modèle thermo-chemo-hydro mécanique est en cours de développement afin d'exploiter les résultats expérimentaux obtenus.

<sup>i</sup> IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports et de l'Aménagement des Réseaux.

<sup>ii</sup> 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>).

## 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-RES/SEREX/LR2E - IFSTTAR MAST EMGCU
Tuteur de thèse :	Quentin GRANDO
Directeur de thèse :	Karim BENZARTI – IFSTTAR MAST NAVIER
École doctorale :	Université Paris-Est/Sciences Ingénierie et Environnement
Financement de thèse :	IRSN/IFSTTAR

La surveillance des structures du génie civil constitue un enjeu majeur et fait encore l'objet de nombreuses recherches. En particulier, les problématiques de coût, de durabilité des capteurs et de fiabilité des mesures restent des aspects fondamentaux à prendre en compte 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 (exposés à l'environnement climatique extérieur) ou noyés à l'intérieur de la structure en béton (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 éprouvettes de béton 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 cylindres en béton puis immergés dans une solution alcaline 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 et des cycles gel/dégel afin de simuler l'agressivité de l'environnement extérieur. Des essais d'arrachement câble/béton sont réalisés à différentes échéances de vieillissement et une dégradation de l'interface est remarquée pour l'un des deux câbles noyés dans le béton. L'évolution du transfert d'effort du béton vers le cœur de la fo sera évaluée numériquement en intégrant les résultats expérimentaux dans un modèle aux éléments finis.

En parallèle, plusieurs blocs de béton du projet ODOBA ont été instrumentés au moyen de câbles fo noyés et collés en parement (les blocs ZA, IA, KB 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-granat : RAG et couplage RAG / RSI). Actuellement, des cycles de vieillissement accéléré sont appliqués sur ces blocs (pour déclencher les pathologies). Toutefois, d'après les premières mesures par capteurs fo, les pathologies de gonflements ne sont pas encore déclenchées dans les blocs.



Instrumentation par capteurs à fibres optiques collés en surface du bloc KB (Juillet 2019)

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Joffrey LHONNEUR
Date du début de la thèse :	21/11/2017
Laboratoire :	PSN-RES/SEMIA/LPTM
Tuteur de thèse :	Céline PELISSOU
Directeur de thèse :	Saïd EL YOUSOUFI – LMGC Montpellier
Co-directeur :	Yann MONERIE – LMGC Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier /Information, structures, systèmes
Financement de thèse :	IRSN

L'extension de la durée de vie des centrales nucléaires exige de quantifier l'impact des mécanismes de vieillissement des structures en béton sur les caractéristiques mécaniques de leurs enceintes de confinement. Cette thèse s'intéresse au mécanisme de vieillissement induit par un gonflement interne du béton, de type Réaction Sulfatique Interne (RSI).

La démarche initiale consistait à s'appuyer sur des expériences précédemment réalisées dans le cadre du MIST, au sein du LMGC à une échelle dite locale (de l'ordre du centimètre) pour permettre l'identification des comportements mécaniques locaux des différentes phases d'un béton. Une étude numérique réalisée lors de la première année de thèse sur l'essai de traction a montré qu'il ne permettait pas d'identifier des paramètres cohésifs des échantillons testés.

Lors de la seconde année, j'ai élaboré et mis en place un essai de flexion trois points à l'échelle locale pour permettre d'identifier plus aisément les paramètres élastiques et cohésifs de matériaux et d'interfaces fragiles. Une étude numérique, menée avec le logiciel Xper (développé à l'IRSN), tente de relier les paramètres cohésifs à la vitesse de propagation de la fissure et à l'énergie mécanique apportée pour rompre l'éprouvette. Une méthode innovante de mesure de la vitesse de propagation d'une fissure utilisant une peinture conductrice d'électricité a également été mise en place ainsi qu'une méthode de Corrélation d'Images Numériques (CIN) spécifique à l'essai pour identifier les modules d'élasticité des échantillons testés.

La troisième année sera consacrée à l'identification des paramètres sur des échantillons sains et au développement d'un essai de compression à une échelle supérieure, dite intermédiaire. Cet essai permettra de vérifier si les paramètres identifiés à l'échelle locale peuvent être utilisés pour la prédiction numérique de la rupture d'une éprouvette « modèle » de béton (22x11x2 cm<sup>3</sup>) contenant une collection de granulats circulaires ou parallélépipédiques. L'influence du développement de la pathologie RSI sur les paramètres identifiés à cette échelle sera ensuite étudiée.

Les premiers résultats montrent des difficultés tant sur le plan expérimental que numérique. La préparation des éprouvettes doit être améliorée pour éviter le développement de fissures durant leur conservation et améliorer l'homogénéité de leur microstructure initiale. Sur le plan numérique, le modèle « volumique-cohésif » utilisé semble insuffisant pour représenter la physique d'une rupture fragile. Il faudrait utiliser un critère d'initiation en facteur d'intensité des contraintes pour permettre de modéliser l'initiation d'une fissure à partir d'un état de contrainte à la fois homogène et divergent au voisinage d'une singularité.

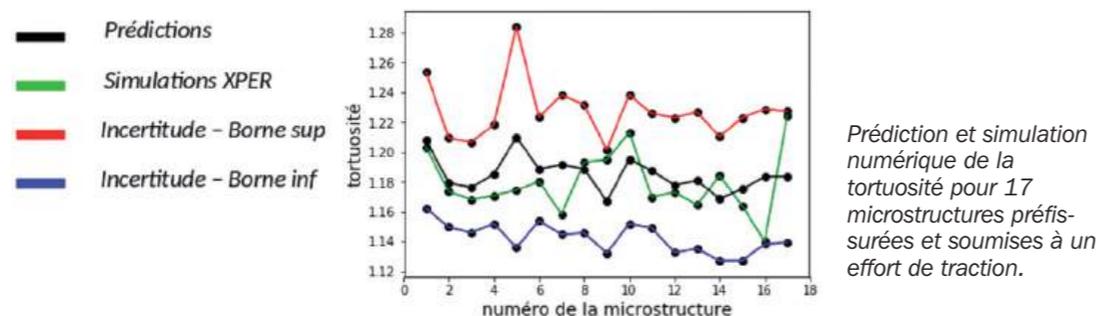
## Sujet de la thèse :

**Modélisation de la prédiction de fissures sur la base de descripteurs morphologiques locaux : application à la génération de microstructures équivalentes dans les études du vieillissement des matériaux cimentaires**

Doctorant : Kathleen PELE  
 Date du début de la thèse : 16/10/2017  
 Laboratoire : PSN-RES/SEMIA/LIMAR  
 Tuteur de thèse : Frédéric PERALES/Jean BACCOU  
 Directeur de thèse : Loïc DARIDON – Laboratoire Mécanique et Génie Civil  
 Co-directeur de thèse : Jacques LIANDRAT – École Centrale de Marseille  
 École doctorale : Aix-Marseille Université/Informatique et Mathématique de Marseille  
 Financement de thèse : IRSN/École Centrale de Marseille

Sûreté

L'un des axes de recherche de l'IRSN porte sur le vieillissement des matériaux des centrales, notamment le béton composant l'enceinte de confinement. Les propriétés thermo-chimio-mécaniques du béton peuvent évoluer au cours du temps et provoquer des dégradations de l'enceinte. Il est alors important de suivre l'état de ces détériorations, notamment en termes de chemins de fissuration qui peuvent impacter l'étanchéité de la structure. Le recours à des représentations numériques du béton réel et à des simulations de la fissuration avec le logiciel XPER aide à mieux comprendre ces mécanismes. L'hétérogénéité du matériau nécessite cependant, d'effectuer un nombre de simulations conséquent afin d'obtenir des grandeurs d'intérêts correctes et le temps de calcul associé peut être très élevé. L'objectif de la thèse est donc la construction d'un outil statistique rapide permettant de comparer deux microstructures en termes de chemins de fissure sans avoir à réaliser de calcul XPER. La construction d'un matériau numérique équivalent à un béton réel s'appuie principalement sur l'utilisation de descripteurs morphologiques. Cependant, deux microstructures ayant les mêmes descripteurs globaux classiquement utilisés peuvent présenter des comportements de fissuration différents. Le travail comporte deux volets de recherche : le premier porte sur la construction de descripteurs locaux adaptés à l'étude de la fissuration, le second vise à construire un modèle de prédiction de fissure basé sur ces descripteurs. Le développement de deux descripteurs géométriques locaux a fait l'objet de la première année de thèse. En 2<sup>ème</sup> année, ces descripteurs ont ensuite été utilisés dans la construction d'un modèle de prédiction de type chaîne de Markov. Plusieurs applications pour des microstructures avec des granulats de formes différentes ont été réalisées. Elles ont montré que notre modèle permet de prédire correctement les grandeurs mécaniques d'intérêt (tortuosité) sans avoir recours à une simulation XPER (Figure) en fournissant l'incertitude de prédiction. Une perspective de ce travail est de coupler le modèle de prédiction avec un calcul mécanique afin d'étudier des cas plus complexes issus des calculs de structures.



## ► Viellissement des structures et équipements des installations

## Matériaux et composants métalliques

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

Travaux référencés dans la démarche de recherche  
 « Stockage géologique profond » : page 44

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

## Sujet de la thèse :

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

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

Sûreté

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



Au cours du temps, les atomes de carbone présents dans le cristal migrent vers les dislocations et forment des « atmosphères de Cottrell »<sup>[1]</sup> qui en bloquent le mouvement. Ce mécanisme d'ancrage des dislocations, essentiel dans la description du vieillissement sous irradiation, est encore mal compris. L'objectif de cette étude est de caractériser la mobilité des dislocations dans le fer cubique centré, en tenant compte à la fois de ces atmosphères, de leurs interactions avec les cœurs de dislocations<sup>[2]</sup>, et de la présence de défauts générés par irradiation.

Pour cela, il est nécessaire de combiner des calculs à différentes échelles : *ab initio*, simulations atomistiques (Dynamique Moléculaire), Monte Carlo Cinétique et Dynamique des Dislocations. A l'échelle atomique, les interactions entre atomes peuvent être calculées de façon simplifiée à l'aide d'un potentiel empirique, permettant de traiter des systèmes de plusieurs millions d'atomes. Notre travail a montré que les potentiels proposés dans la littérature échouent à fournir une description satisfaisante des propriétés des dislocations vis dans le système fer-carbone connues expérimentalement ou par calculs *ab initio*. Nous avons donc mis au point un potentiel d'interaction hybride, basé sur les deux potentiels existants présentant les meilleures performances<sup>[3][4]</sup>.

L'utilisation de ce potentiel a permis d'examiner en détail l'ancrage des dislocations par une solution solide de carbone *via* des simulations atomistiques, afin de relier l'environnement d'une dislocation à sa mobilité. Ces résultats permettent de caractériser les événements élémentaires qui constituent le mécanisme de la déformation plastique, qui seront intégrés à un modèle Monte Carlo Cinétique. La mise au point de ce modèle permettra de dégager une loi de mobilité des dislocations au cours du vieillissement, qui sera intégrée à un modèle de Dynamique des Dislocations, permettant ainsi une transition vers les échelles supérieures.

## ➤ Activité en SHS

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

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

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

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

[2] Ventelon *et al.* Phys. Rev. B. 91 (2015)

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

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

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Alexandra WARTEL
Date du début de la thèse :	14/10/2019
Laboratoire :	PSN-SRDS/SHOT/LSHS
Tuteur de thèse :	Céline PORET
Directeur de thèse :	Johann PETIT - INP Bordeaux
École doctorale :	Université de Bordeaux/Sociétés, Politiques, Santé publique
Financement de thèse :	IRSN

Ce projet de thèse s'inscrit dans la stratégie scientifique de l'IRSN car il traite de l'impact des activités humaines, précisément lors de l'utilisation de rayonnements ionisants, sur la sécurité des patients. L'objectif de cette recherche est de comprendre comment les activités collectives distribuées dans l'espace et dans le temps entre différents acteurs, appelées « *activités collectives transverses* » (Petit, 2005<sup>[1]</sup>; Motté & Haradji, 2010<sup>[2]</sup>; Poret, 2015<sup>[3]</sup>), contribuent à une performance d'ensemble lors du processus de préparation du traitement de radiothérapie externe. Cette préparation, distribuée entre différents acteurs, à des moments différents, doit permettre d'assurer la sécurité des patients. Des manques de fluidité dans ce processus ont été constatés par l'unité d'expertise médicale (UEM). La problématique générale de la thèse consiste à comprendre l'origine de ces manques et leurs impacts possibles sur la sécurité des patients.

Une immersion dans un hôpital public fut l'occasion de mettre en avant la difficulté de définir la préparation et que les acteurs réussissent à traiter les patients en sécurité dans la plupart des cas malgré une distribution de la préparation entre divers acteurs, à des moments différents du processus. L'objectif de la thèse est d'identifier les régulations mises en place par les acteurs dans le but d'assurer les soins en sécurité ainsi que les types d'organisation qui favorisent ou entravent cette activité collective de préparation du traitement des patients.

La première étape est d'établir une définition précise de la préparation du traitement grâce à des entretiens et une revue de littérature en l'articulant aux enjeux de sécurité. Ensuite, nous serons en mesure de choisir les critères de sélection des terrains d'observation. Un des enjeux de ce travail est également de tirer des enseignements utilisables dans d'autres secteurs, car les enjeux de performance transversale sont généralisés, y compris dans le secteur de la sûreté nucléaire.

[1] Petit, J. (2005). Organiser la continuité du service : Intervention sur l'organisation d'une mutuelle de santé. Thèse pour l'obtention du grade de docteur en ergonomie de l'université Bordeaux 2.

[2] Motté, F., & Haradji, Y. (2010). Construire la relation de service en considérant l'activité humaine dans ses dimensions individuelles et collectives. Dans G. Valléry, M.-C. Le Port, & M. Zouinar, Ergonomie, conception de produits et services médiatisés. Paris: PUF.

[3] Poret, C. (2015). Concevoir pour le Pouvoir d'agir ensemble d'un collectif transverse. Le cas de la relation de service dans le domaine commercial. Thèse de doctorat - Université Paris VIII.

## 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 :	Sciences Économiques et Sciences De Gestion rattaché à l'IMT-Atlantique
Financement de thèse :	IRSN

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

Le premier objectif de la thèse est de soumettre cette proposition à une revue critique. En effet, elle soulève plusieurs questions : Quelles sont les sources (rapports de commission d'enquêtes, études...) d'enseignements mobilisés ? Quelles sont leurs qualités, leurs limites, et leur profondeur d'analyse d'un point de vue organisationnel, sociotechnique et systémique ? Sous quelles conditions des connaissances peuvent être produites et transférées d'un secteur à un autre ? Qui sont les chercheurs et les experts qui produisent cette connaissance et comment travaillent-ils ? Cette histoire internationale des accidents industriels est-elle constituée et partagée ?

Un travail de revue de la littérature scientifique dans le domaine de la sécurité industrielle et des accidents est au programme de l'année 2020, avec la réalisation d'entretiens avec des producteurs de cette connaissance.

Le second objectif de la thèse aborde l'enjeu opérationnel de la mobilisation de ces connaissances issues de l'analyse des accidents du passé dans le cadre de la prévention, principalement dans le cadre de l'expertise. Ce second objectif porte le questionnement sur les pratiques et les compétences mises en œuvre par les utilisateurs, et ouvre ensuite sur les mécanismes et les dispositifs de gestion pour faciliter la mobilisation des connaissances des accidents et leur utilisation.

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

La mise en discussion des résultats empiriques avec le cadre théorique (dans le domaine des sciences de gestion) est au programme de 2020.

Dechy, N., Dien, Y., Llory M. (2010), Pour une culture des accidents au service de la sécurité industrielle, Congrès Im17 de l'IMdR, La Rochelle, 5-7 Octobre

**Sujet de la thèse :**

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

**Doctorant :** Gauthier FONTAINE  
**Date du début de la thèse :** 01/10/2018  
**Laboratoire :** PSN-SRDS/SHOT/LSHS  
**Tuteur de thèse :** Christine FASSERT  
**Directeur de thèse :** Pierre WAGNER - Université Paris 1  
**École doctorale :** Sorbonne Université/École doctorale de philosophie  
**Financement de thèse :** IRSN

---

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

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

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

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

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

# AD'U[N]

Association des doctorants  
de l'IRSN

## Nos missions :

1

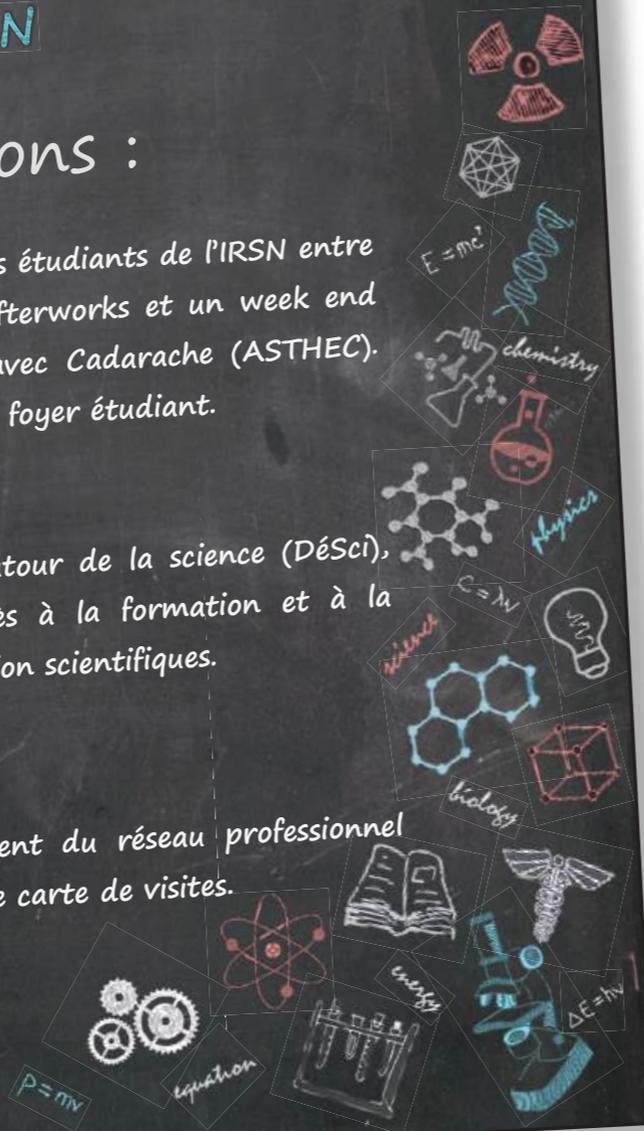
Rapprocher les étudiants de l'IRSN entre eux via des afterworks et un week end de cohésion avec Cadarache (ASTHEC).  
Création d'un foyer étudiant.

2

Discussion autour de la science (DÉSci), aide à l'accès à la formation et à la communication scientifiques.

3

Développement du réseau professionnel et service de carte de visites.



## Comment nous rejoindre ?

Pour adhérer, rien de plus simple ! L'inscription est gratuite !  
Il suffit de remplir le formulaire d'inscription sur le site internet de l'association :

[www.adinasso.com](http://www.adinasso.com)

ou en nous envoyant un mail à l'adresse suivante :

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

Si tu as des idées pour nous aider dans l'association ou pour toutes tes demandes, n'hésite à nous contacter par mail !

Céline  
Vice-Présidente

Ségolène  
Présidente

Mohammed  
Trésorier

Sarah  
Secrétaire



{ ASTHEC }

Association des  
THEsards de Cadarache



**Centre de Cadarache**

Grand pôle de recherche sur les énergies

2150 salariés CEA - 1000 salariés IRSN  
350 doctorants, stagiaires, apprentis  
1000 salariés d'entreprises extérieures



CEA Cadarache  
13108 St Paul lez Durance Cedex

Retrouvez de nombreuses informations sur notre site

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



Facebook ASTHEC



Et n'hésitez pas à nous contacter via l'adresse [contact@asthec.org](mailto:contact@asthec.org)

**|| Sorties sportives**

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



**|| Visite de labo**

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



**|| Weekend d'intégration**

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

L'année dernière :

- Deux nuits à Embrun ,
- Air Board,
- Raquette,
- Apéritif,
- Jeux de groupe



**|| Sorties mondaines**

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



**|| Fête de la Science AEP**

Sensibilisation du public français à l'énergie nucléaire et à toutes les activités scientifiques de Cadarache



## INDEX DES PRÉSENTATIONS

Kossi Dovéné ABALO	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	35
Ismail ALJ	PSN-RES/SEREX/LR2E - UGE	134
Arnaud ALLERA	PSN/SEMIA/LPTM	138
Coralie ALVAREZ	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	88
Abdellatif AMMAR	IRSN/PSN-EXP/SES/LMAPS	133
Abdellah AMRI	PSE-ENV/SEDRE/UEMIS	43
Oumar Telly BAH	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC	62
Mathilde BANJAN	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN - IsTerre Chambéry	79
Marion BAQUES	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN - Observatoire de la Côte d'Azur	80
Yara BARAKAT	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	40
Marion BELLONI	PSE-SANTE/SESANE/LEPID	37
Lydia BENSEMMANE	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	26
Mohammed BENSIALI	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LEDI	12
Juan Antonio BLANCO	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN - IN2P3	87
Nathan BODEREAU	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	52
Marine BOUDIAS	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI	56
Sarah BRAGA-COHEN	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	22
Clément BROSSARD	PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	24
Aubin BRUNEL	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	127
Elsa CANTABELLA	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	66
Clément CAR	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	71
Coralie CARRIER	IRSN/PSE-ENV/SAME/LERCA	15
Robert CAULK	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	42
Hamza CHAIF	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	50
Rafael CHAVES DEPTULSKI	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	41
Delphine COSTA	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC - UPEC	108
Nicolas DECHY	RSN/PSN-SRDS/SHOT/BFOH	141
Hugues DELATTRE	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	82
Adrien DELAVAL	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	51
Charlotte DEWITTE	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	46
Ethel-Borel DJEUMEN NKWECHEN	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	84
Elizabeth DUFOURCQ SEKATCHEFF	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	67
Joffrey DUMONT LE BRAZIDEC	IRSN/PSE-SANTE/SESUC/BMCA	63
Aymeric EDELIN	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	98
Mohamad FARHAT	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	103
Alexandre FIGUEIREDO	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR - LCE-IRA	61
Gauthier FONTAINE	IRSN/PSN-SRDS/SHOT/LSHS	142
Anaïs FOUCAULT	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	34
Kévin FROHLICHER	IRSN / PSN-EXP/SNC/LN	95
Bassam GAMAL	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	123

Juliana GARCIA SARMIENTO	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	99
Mallia GEIGER	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	25
Stavroula-Isidora GIANNAKANDROPOULOU	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	44
Noémie GUIRANDY	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	68
Sandra GYASI	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	102
Daniel HARDY	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA - University of Bristol	58
Gwenaël HOARAU	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	109
Hanaa HOUJEIJ	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC - Université de Bordeaux	60
Manon JACQUEMIN	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LEDI	13
Jérémie JANIN	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	125
Clément JEANNESSON	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	92
Amel KORT	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	107
Ségolène LADAIGUE	IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed	21
Kévin LALANNE	IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LMDN	20
Géraldine LANDON	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LRSI	27
Elouan LE FESSANT	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	104
Marie LECOQ	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	115
Pierre LEFEBVRE	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LELI - Sorbonne Université	54
Maëva LELOIRE	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC - UCCS	116
Joffrey LHONNEUR	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LSMA	135
Hantao LIN	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	117
Juan Esteban LUNA VALENCIA	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LEMC - Université de Lorraine	85
Léo MACÉ	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LRTOX	31
Anaëlle MAGRE	IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE	16
Jimmy MARTIN	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LSMA	89
Marguerite MATHEY	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	78
Modou MBAYE	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	112
Romain MEINIER	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	122
Arnaud MONTABERT	PSE-ENV/SCAN/BERSSIN - PSN-EXP/SES/LMAPS	77
Amandine MOREREAU	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRTA	53
Jean MULLER	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LSMA	86
Corentin NOUGIER	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	124
Fiiia NURMINEN	RSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN - Université de Chieti	76
Jonathan NUVOLI	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	114
Dina OKHRIMCHUK	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	55
Mélody PALLU	LPC2E	14
Samuel PEILLON	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	110
Kathleen PELE	PSN-RES/SEMIA/LIMAR	136
Arthur PICHELIN	IRSN/PSN-EXP/SES/LMAPS	132
Julie POUYA	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	45

Loïc QUEVAREC	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	69
Nicolas REY	RSN/PSE-SANTE/SESANE/LRTOX	30
Zeinab RIDA	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	106
Aya RIMA	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT)	120
Aurélien RIOT	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	111
Laurie SAINT CRIQ	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BEHRIG	81
Vivian SALINO	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	93
Rihab SASSI	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	74
Magali SCHIANO DI LOMBO	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	70
Gabriela SENRA PESSANHA RIOS NOBREGA	IRSN/PSN-RES/SAG/BEAM	129
Céline SERRANO	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LRTOX	32
Audrey SOULOUMIAC	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LECO	72
Ayedah TARIQ	IRSN/PSE-ENV/SEDRE/LETIS	47
Flomin TCHAWÉ NZIAHA	IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN	75
Romain VUIART	IRSN/PSN-EXP/SNC/LN	94
Valentin WALKER	IRSN/PSE-SANTE/SESANE/LEPID	36
Alexandra WARTEL	PSN-SRDS/SHOT/LSHS	140
Laura VASTIER	IRSN/PSN-RES/SAG/BEAM	128
Linkai WEI	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	126
Jiaxin XU	IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE	17
Sarah ZAMANE	IRSN/PSE-ENV/SRTE/LR2T	57

## 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

BEAM : Bureau d'études des accidents majeurs

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

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

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

LPMA : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

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

LEF : Laboratoire d'expérimentation des feux

LIE : Laboratoire de l'incendie et des explosions

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

LIMAR : Laboratoire incertitude et modélisation des accidents de refroidissement

LPTM : Laboratoire de physique et de thermomécanique des matériaux

LSMA : Laboratoire de statistique et des méthodes avancées

LEMC : Laboratoire d'étude et de modélisation du combustible

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

PSN - 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

LMAPS : 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

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

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

**BMCA** : Bureau de modélisation des transferts dans l'environnement  
pour l'étude des conséquences des accidents

### **PSE - ENV : Thématique Environnement, déchets et géosphère**

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

**LMRE** : Laboratoire de métrologie de la radioactivité  
dans l'environnement

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

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

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

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

**PSE - ENV/SEDRE** : Service des Déchets Radioactifs et des transferts dans la géosphère

**LETIS** : Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les  
interactions dans les sous-sols

**LELI** : Laboratoire de recherche sur le devenir des pollutions de sites  
radioactifs

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

**PSE - ENV/SRTE** : Service de Recherche sur les Transferts et les Effets des radionucléides  
sur les écosystèmes

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

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

**LRC** : Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville

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

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



31, avenue de la Division Leclerc  
92260 - Fontenay-aux-Roses  
RCS Nanterre 546 018  
**Référence:** DST/SP<sup>3</sup>In 2020-00019  
**COURRIER**  
BP.17 - 92262 Fontenay-aux-roses  
Cedex

**TÉLÉPHONE**  
+33 (0)1 58 35 88 88  
**SITE INTERNET**  
[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)  
**E-MAIL**  
[contact@irsn.fr](mailto:contact@irsn.fr)  
 [@irsn\\_france](https://twitter.com/irsn_france)

