



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

du 28 au 31 mars

# Journées des thèses 2017

Carry le Rouet



DIRECTION DE LA STRATÉGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DES PARTENARIATS

# Journées des thèses Carry le Rouet, 2017

› › › 28 - 31 mars

## Programme

**➤ Mardi 28 mars**

- 11 h Arrivée sur site
- 12 h Déjeuner

**➤ Mardi 28 mars - après-midi**

13h30 ➤ OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES

Jean-Christophe NIEL (Directeur général)

➤ PRÉSENTATION DE L'ADI(N)

➤ SESSION PLÉNIÈRE ➤ Salle Bord de mer

**Diffusion dans les matériaux cimentaires et argileux**

Jacques JABBOUR, Méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons à l'échelle des ouvrages.

Eric DELAUME, Méthode de raffinement local adaptatif multi-niveaux pour la fissuration de matériaux hétérogènes.

Catherine YU, Étude comparative des phénomènes de transport convectifs et diffusifs au sein de l'argile à Opalines du Mont Terri.

Agustin MOLINERO GUERRA, Caractérisations expérimentale et numérique du comportement hydro-mécanique d'un matériau hétérogène - poudre / pellets de bentonite.

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

16 h 15 ➤ Pause

16 h 45 ➤ SESSION PLÉNIÈRE ➤ Salle Bord de mer

**L'iode : de l'enceinte à l'environnement**

Houssam HIJAZI, Réactivité chimique des aérosols d'iode en conditions accidentelles dans un réacteur nucléaire.

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

Geoffrey PELLERIN, Quantification des vitesses de dépôt sec et identification des processus d'émission des aérosols sur des couverts naturels.

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

19h 10 ➤ Dîner

Soirée thématique ➤ Salle Bord de mer

Quelles perspectives pour nos chercheurs de demain ?

**► Mercredi 29 mars****08 h 30 ► SESSION PARALLÈLE ► Salle Bord de mer****Effets des faibles doses chroniques**

**Caroline ARCANJO**, Évaluation des modes d'actions toxiques de l'eau tritiée (HTO) sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*).

**Dalila LEBSIR**, Toxicologie de l'iode stable : étude *in vivo* des effets biologiques associés à une prophylaxie répétée par l'iode stable.

**Marie TRIJAU**, Étude à différentes échelles des mécanismes d'action toxique des radiations ionisantes chez *Daphnia magna*.

**Cécile DUBOIS**, Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants : de l'ADN aux protéines.

**08 h 30 ► SESSION PARALLÈLE ► Salle Miajou Labe****Flamme et incendie**

**Romain GROSSEUVRES**, Analyse de propagation de flamme hydrogène / air / vapeur en milieu confiné.

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

**Aryadeep CHAKRABORTY**, Étude de l'effet des produits de radiolyse sur le comportement des recombineurs autocatalytiques passifs (RAPs) et des moyens de prévention de leur inflammation.

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

**David ALIBERT**, Étude de la pyrolyse de matériaux en feu soumis à des régimes de sous-ventilation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé.

**10 h 30 ► SESSION POSTER ► Salle Largado**  
(liste des sujets pages 99 et 117)**12 h 15 ► Déjeuner****14 h 10 ► SESSION PARALLÈLE ► Salle Bord de mer****Irradiation pathologie traitements**

**Jérémy LAVIGNE**, Changements phénotypiques des cellules endothéliales au cours du développement des lésions radiques pulmonaires.

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

**Amélie FRÉNEAU**, Étude de la signalisation et du devenir des dommages initiaux induits par un rayonnement X de basse énergie : comparaison avec un rayonnement X de référence.

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

14 h 10 > SESSION PARALLÈLE > Salle Miajou Labe

### Calculs et méthodes mathématiques

**Sébastien MARMIN**, Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire.

**Nicolas GARLAND**, Méta-modélisation introspective pour l'analyse des phénomènes physiques simulés. Formalisation dans le cadre du co-krigeage et intégration algorithmique en optimisation et inversion.

**Levent ISBILIROGLU**, Élaboration de stratégies de sélection de signaux accélérométriques pour le calcul du comportement des structures.

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

15 h 50 > Pause

16 h 20 > SESSION PARALLÈLE > Salle Miajou Labe

### Thermohydraulique

**Ali SWAIDAN**, Écoulement diphasique dans un milieu à porosité évolutive.

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

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

**Adrien ABBATE**, Simulation expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide.

16 h 20 > SESSION PARALLÈLE > Salle Bord de mer

### Épidémiologie

**Lucie FOURNIER**, Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire.

**Sabine HOFFMANN**, Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chroniques et à faibles doses de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application à une cohorte de mineurs d'uranium.

**Ségolène BOUET-RIVOAL**, Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses au sein d'une cohorte de travailleurs surveillés pour contamination interne.

19 h 10 > Dîner

21 h 00 > Concours « Ma thèse en 3 minutes » > Salle Bord de mer

**► Jeudi 30 mars****08h40 ► SESSION PLÉNIÈRE ► Salle Bord de mer****Pronostic et analyse**

**Mickaël MANGEON**, Le régime de régulation des risques à la lumière de ses instruments : le cas des règles et guides en matière d'inondation appliqués à la sûreté nucléaire.

**Ismail GOUMRI**, Analyse socio-historique de choix controversés en matière de dispositions de sûreté sur les INB françaises.

**Oussama RABOUN**, Analyse mathématique du risque spatialisé en présence de multiples enjeux.

**Thi Phuong Anh MAC**, Développement d'outils d'aide au diagnostic et au pronostic en contexte d'accident nucléaire grave.

**10h20 ► Pause****10h50 ► SESSION PARALLÈLE ► Salle Bord de mer****Rejets d'aérosols dans l'enceinte**

**Ankita JADON**, Interactions entre radionucléides et aérosols de sodium formés lors d'un accident dans un réacteur nucléaire refroidi au sodium.

**Laura FERRY**, Évaluation des rejets en situation accidentelle dans l'installation ITER : béryllium et tritium.

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

**10h50 ► SESSION PARALLÈLE ► Salle Miajou Labe****Dépôt des radionucléides sur les sols et comportement**

**Jackie TAV**, Étude du dépôt par les nuages et les brouillards de radionucléides sur les végétaux.

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

**Lucie STETTEN**, Comportement de l'uranium dans les sédiments lacustres en aval d'anciens sites miniers uranifères : mesures spectroscopiques et modélisation géochimique.

**12h15 ► Déjeuner****13h40 ► SESSION POSTER ► Salle Largado**  
(liste des sujets pages 99 et 117)

15h00 > SESSION PARALLÈLE > Salle Bord de mer

**Dosimétrie et mesure du rayonnement**

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

**Nicolas TKATCHENKO**, Développement de l'utilisation de la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique sur les phanères pour la dosimétrie d'accident radiologique.

**Nadia BENABDALLAH**, Apport de la dosimétrie tissulaire et cellulaire dans le traitement des patients par alphathérapie.

**Benjamin TAMPON**, Qualification de la  $\mu$ -TPC du LNE-IRSN (chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée) comme instrument de références pour les mesures en énergie et en fluence de champs neutroniques de basses énergies (entre 8 keV et quelques MeV).

15h00 > SESSION PARALLÈLE > Salle Miajou Labe

**Confinement et propagation des aérosols et fumées**

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

**Youssef ALILOU**, Impact sur le colmatage en régimes permanent et transitoire des écoulements d'air induits par le plissage de médias filtrants THE.

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

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

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

17h30 > Pause

17h50 > SESSION PLÉNIÈRE > Salle Bord de mer

**Matériaux : de l'atomistique au VER**

**Paul EYMEOUD**, Modélisation atomistique de la fragilisation des gainages combustibles nucléaires par les hydrides.

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

**Mathilde GESTIN**, Étude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température des alliages de gaine de crayons de combustible des centrales nucléaires.

19h20 > Dîner

Soirée organisation ADI[N]

**► Vendredi 31 mars**

09 h 15 ► SESSION PLÉNIÈRE ► Salle Bord de mer

**Transfert des radionucléides**

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

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

.. **Loïc DUCROS**, Comportement et devenir du tritium au sein des hydrosystèmes continentaux côtiers méditerranéens.

**Hugo RENARD**, Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium dans un écosystème prairial.

11 h 00 ► Pause

11 h 20 ► SESSION PLÉNIÈRE ► Salle Bord de mer

**Chimie des accidents**

**Lola SARRASIN**, Mécanismes d'incorporation et de migration du Molybdène dans le dioxyde d'uranium stœchiométrique et sur-stœchiométrique.

**Dorel OBADA**, Évaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un Réacteur à Eau Pressurisée: étude expérimentale de la re-vaporisation de dépôts de produits de fission (Cs, I).

**Kasi GAJAVALLI**, Description thermodynamique des phases dans le ternaire Ag-In-Zr, en particulier à haute température, sur la base d'expériences.

12 h 20 ► CLÔTURE DES JOURNÉES THÈSES ► Salle Bord de mer

**Jean-Michel BONNET**

Directeur adjoint, Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

13 h 00 ► Déjeuner ► Salle Bord de mer



# Sessions posters et autres informations

Sessions posters Pages 99-130

► Sessions les mercredi (10 h30) et jeudi (13 h40)

**Pôle radioprotection**

Résumés pages 99 à 116.

**Pôle sûreté**

Résumés pages 117 à 130.

Quelles perspectives pour nos chercheurs de demain? Page 20

Concours «Ma thèse en 3 minutes» Page 55

Soirée organisation ADI(N) Page 87

Présentation de l'ADI(N) Page 131

L'insertion professionnelle  
des doctorants de l'IRSN (2009 – 2014)  
et leurs publications Pages 132-133

*Le Centre de Ressources en Information Scientifique,*  
l'aide indispensable pour votre veille scientifique Page 134

*Propriété industrielle et brevets,*  
Protéger ses résultats scientifiques Page 135

Liste des participants Pages 136-140

Liste des services et laboratoires  
d'appartenance des doctorants Pages 141-142

➤ **Mardi 28 mars**

13h30

**Salle Bord de mer**

## **OUVERTURE**

**Jean-Christophe NIEL** (Directeur général)

## **SESSION PLÉNIÈRE**

### **Diffusion dans les matériaux cimentaires et argileux**

**Président : Georges NAHAS**

Conseiller scientifique projet Odoba  
Pôle sûreté nucléaire

**Jacques JABBOUR**, Méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons à l'échelle des ouvrages.

**Eric DELAUME**, Méthode de raffinement local adaptatif multi-niveaux pour la fissuration de matériaux hétérogènes.

**Catherine YU**, Étude comparative des phénomènes de transport convectifs et diffusifs au sein de l'argile à Opalines du Mont Terri.

**Agustin MOLINERO GUERRA**, Caractérisations expérimentale et numérique du comportement hydro-mécanique d'un matériau hétérogène - poudre / pellets de bentonite.

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

**Sujet de la thèse :****Méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons à l'échelle des ouvrages**

Doctorant :	Jacques JABBOUR
Date du début de la thèse :	20 / 10 / 2014
Laboratoire :	PSN / SES / BEGC
Tuteur de thèse :	Aveline DARQUENNES, Loic DIVET, Rachid BENNACER, Stéphane LAVAUD
Directeur de thèse :	Georges NAHAS
Co-Directeur de thèse :	Jean-Michel TORRENTI - IFSTTAR
Ecole doctorale :	EDSP ENS - Cachan
Financement de thèse :	IRSN

La Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alkali-Granulats (RAG) sont des réactions chimiques pouvant induire des pathologies du béton, les réactions de gonflement interne. Ces réactions dans leur phase de développement conduisent dans les ouvrages à la mise en traction du béton et à la création de fissures. Dans les ouvrages nucléaires, l'éventualité d'apparition de ces phénomènes ne peut pas être écartée et serait accrue avec le prolongement de la durée de vie des installations. Cependant, la cinétique du développement de ces réactions et l'apparition des désordres dans les ouvrages est en général lente (jusqu'à quelques dizaines d'années), limitant les études de R&D et les possibilités de programmes expérimentaux. Une solution consiste à utiliser des protocoles d'essais de vieillissement accélérés mis au point sur des éprouvettes ou des échantillons extraits par carottage. Cependant l'extrapolation des résultats à l'échelle de l'ouvrage est toujours un sujet de recherche.

L'objectif de cette thèse est l'adaptation des protocoles d'essais de vieillissement accélérés (développement maîtrisé de la pathologie) sur éprouvette à des structures représentatives d'un ouvrage réel. Les bétons étudiés sont similaires ou équivalents aux bétons utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil nucléaires (enceintes de confinement, radiers des réacteurs nucléaires, ...).

Trois maquettes représentatives d'un ouvrage massif ont été réalisées dans des conditions maîtrisées et optimales pour le développement de la RSI, de la RAG et de la concomitance des deux pathologies RAG-RSI. Une méthode innovante de suivi par fibre optique a été mise au point permettant de mesurer les champs de déformation de gonflement et de température au sein des maquettes pendant l'évolution des pathologies.



(a)



(a)

Une étude expérimentale est également menée afin d'étudier l'effet d'échelle de la structure. L'évolution des déformations de carottes extraites des maquettes (selon la méthode d'essai N°67 de l'Ifsttar) sera comparée à celle d'éprouvettes en béton reconstitué ayant subi les mêmes conditions. Une confirmation de l'origine des gonflements et de la pertinence de la méthode de vieillissement accélérée développée sera recherchée par des observations MEB.

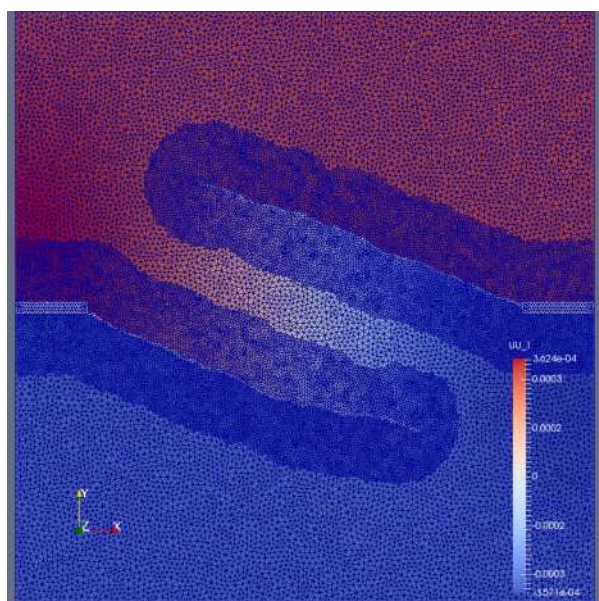
Figure 1: (a) maquette représentative d'un ouvrage massif  
(b) maquette fissurée.

**Sujet de la thèse :****Méthode de raffinement local adaptatif multi-niveaux  
pour la fissuration des matériaux hétérogènes**

Doctorant :	Eric DELAUME
Date du début de la thèse :	06 / 11 / 2014
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES
Directeur de thèse :	Loïc DARIDON – Laboratoire de Mécanique et Génie Civil - MIST
Ecole doctorale :	Université de Montpellier - I2S
Financement de thèse :	IRSN

Afin d'anticiper les effets du vieillissement des centrales électronucléaires, l'IRSN mène des activités de recherches amont sur le vieillissement du béton (enceinte de confinement) et des métaux (cuve, internes de cuve). Les méthodes micromécaniques développées au sein du laboratoire commun MIST (IRSN-CNRS-Univ. Montpellier) permettent de modéliser la multi-fissuration et la ruine des matériaux hétérogènes au fur et à mesure que leur propriétés microstructurales évoluent avec le temps. Les modèles de fissuration employés relèvent de la classe des modèles cohésifs et requièrent des discrétisations spatiales particulièrement fines.

L'objectif de ce travail de thèse est de limiter aux zones d'intérêt les raffinements locaux de la discrétisation spatiale afin de diminuer le temps de calcul. Au cours du calcul, le maillage est modifié à l'aide de la méthode Conforming Hierarchical Adaptive Refinement MethodS (CHARMS) basée sur le raffinement/déraffinement des fonctions de base. Cette méthode ne présente pas les inconvénients des autres méthodes de remaillage (mailles dites « plates », perturbation du maillage loin de la zone d'intérêt, etc). Différents indicateurs de raffinement sont envisagés selon la physique du problème considéré. Après avoir validé la programmation de la méthode de raffinement adaptatif pour les éléments finis dans le code de calcul XPER (logiciel développé à l'IRSN permettant de simuler la fragmentation dynamique des milieux hétérogènes), la méthode est également appliquée et validée pour l'approche « Eigen-Erosion » à l'efficacité numérique encore accrue (voir Figure).



La dernière étape de la thèse est l'introduction « à la volée » de modèles cohésifs à l'interface entre les mailles raffinées selon le critère de propagation « Eigen-Erosion ». Ces développements numériques permettraient de réaliser des simulations jusqu'alors rédhibitoires en termes de temps calculs, comme la simulation de la propagation de fissures 3D dans un béton hétérogène ferrailé.

Figure : propagation de fissures avec la méthode « Eigen-Erosion » pour le cas test Nooru-Mohamed (1992) en chargement mixte et raffinement adaptatif. Le code couleur correspond au déplacement vertical.

**Sujet de la thèse :****Étude comparative des phénomènes de transport convectifs et diffusifs  
au sein de l'Argile à Opalines du Mont Terri**

<b>Doctorant :</b>	<b>Catherine YU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>20 / 10 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-DGE / SRTG / LETIS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Jean-Michel MATRAY</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Julio GONÇALVÈS – CEREGE</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>AMU / ED251</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Consortium du Mont Terri</b>

---

L'Argile à Opalines (OPA), étudiée au laboratoire du Mont Terri, fait partie des formations argileuses sélectionnées comme roche hôte potentielle d'un stockage profond de déchets radioactifs de Haute Activité et à Vie Longue (HAVL). La thèse s'intéresse aux propriétés de confinement des argilites, dont l'évaluation est essentielle pour l'analyse de sûreté d'un site de stockage géologique. Elle poursuit et complète les études que mène l'IRSN dans son laboratoire de Tournemire (Aveyron) pour expertiser les travaux de l'Andra sur l'argilite du Callovo-Oxfordien à Bure.

Quel phénomène de transport domine l'autre entre la convection sensu largo (incluant la chemo-thermo-osmose) et la diffusion au sein de l'OPA et comment un transitoire hydraulique et chimique impacte le transfert des radionucléides ? Pour y répondre, plusieurs partenaires du projet Mont Terri (Swisstopo, Nagra, NWMO, BGR, GRS et IRSN) se sont associés pour réaliser un forage profond via l'expérience *Deep Borehole*, s'appuyant sur un forage incliné long de 250 mètres et équipé d'un système hydraulique multi-obturbateur.

Un premier volet expérimental a permis d'acquérir les paramètres de transport (advectifs et diffusifs, gradients de force associés) nécessaires à l'estimation des flux d'eau et de solutés entre l'OPA et les aquifères adjacents. Un profil de perméabilité a été obtenu à partir de données pétrophysiques et de tests hydrauliques. Les coefficients d'emmagasinement spécifique ont été estimés avec un modèle hydromécanique basé sur les déformations poro-élastiques engendrées par les marées. Des coefficients de diffusion ainsi que la chimie des eaux porales ont été évalués par des tests de diffusion et de lixiviation. Les résultats obtenus sont globalement cohérents avec les données acquises précédemment au niveau du laboratoire souterrain mais montrent aussi des différences liées à la position du forage hors de toute zone perturbée par l'excavation de galeries.

L'inversion du profil de chlorure par méthode Bayésienne de type MCMC (pour Monte Carlo Markov Chain) valide l'évolution paléohydrogéologique du site proposé dans la littérature en considérant un transport diffusif pur à travers la formation argileuse. Ce modèle est justifié par un faible nombre de Péclet de l'ordre de 0,4 confirmant le caractère dominant de la diffusion par rapport au transport convectif. En outre, les calculs en régime de quasi équilibre hydraulique indiquent une faible contribution des phénomènes osmotiques à la surcharge hydraulique observée à la base de l'OPA. Les résultats de cette étude permettront d'affiner les calculs de performance réalisés dans le cadre d'un stockage HAVL, en précisant le modèle à adopter pour mieux évaluer le transfert des radionucléides.

## Sujet de la thèse :

**Caractérisations expérimentale  
et numérique du comportement hydro-mécanique d'un matériau  
hétérogène - poudre / pellets de bentonite**

Doctorant :	Agustin MOLINERO GUERRA
Date du début de la thèse :	30 / 10 / 2014
Laboratoire :	PRP-DGE / SRTG / LETIS
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Directeur de thèse :	Yu-Jun CUI, Ecole des Ponts ParisTech
Ecole doctorale :	Université Paris-Est
Financement de thèse :	IRSN

This work is part of the IRSN's SEALEX project focused on sealing experiments (identifying conditions such as technical specifications, design, construction, defects... that will control the performance of swelling clay-based sealing systems at long-term). Actually, bentonite pellets and powder mixtures are considered as possible materials for galleries and shafts sealing plugs, which should participate to long-term water tightness in deep radioactive waste disposals. These mixtures have low permeability, high swelling capacity and radionuclide retardation properties. It is therefore essential to understand their hydro-mechanical (HM) behaviour when assessing the overall repository safety. In real conditions, once the initially heterogeneous unsaturated powder/pellet bentonite mixture will be emplaced, they will be subject to coupled HM loadings, both a hydration due to infiltration of pore water from the natural barrier and a mechanical confinement from engineered barriers.

The present work investigates the material HM behaviour at two scales.

**At the microscopic scale**, the material is studied by several techniques (MIP,  $\mu$ -CT and SEM). From MIP (mercury intrusion porosimetry), a bimodal distribution was found for the powder whereas a single family of pores was found for a pellet at its initial state. A shifting of the mean diameter of micro-pores of a pellet was observed at suctions lower than 9 MPa. From  $\mu$ -CT (X-ray computed microtomography) observations, heterogeneity was revealed in the pellet internal structure: heterogeneous density distribution of the clay minerals and presence of several high density components.

**At the macroscopic scale**, two small scale mock-ups (1/10 scale of large scale *in situ* experiments conducted in the SEALEX project), were carried out. They allow studying the HM behaviour of the pellet/powder mixture by means of swelling pressure and relative humidity monitoring and  $\mu$ -CT observations. The first mock-up, aiming at studying the swelling

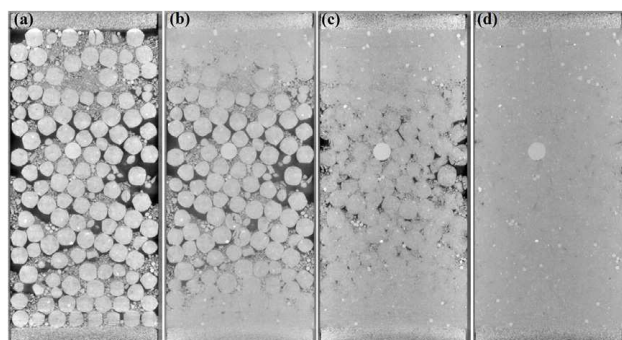


Figure 1. X-ray computed microtomography ( $\mu$ -CT) observations of the pellet/powder mixture at its initial state (a), after 4 days of hydration (b), after 27 days of hydration (c) and after 98 days of hydration (d).

behaviour, evidences an anisotropic swelling due to its complex structure. From the second mock-up test, the initial heterogeneous distribution of both components evolves towards a homogeneous swollen bentonite after wetting, where all voids are filled (Fig. 1).

In this coming year, a double porosity model taking into account the swelling properties of the material characterized at both scales will be proposed in order to simulate the tests carried out during the PhD work as well as the *in situ* SEALEX experiments.

**Sujet de la thèse :**

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

<b>Doctorant :</b>	Ashish RAJYAGURU
<b>Date du début de la thèse :</b>	02 / 11 / 2015
<b>Laboratoire :</b>	PRP-DGE / SRGT / LETIS
<b>Tuteur de thèse :</b>	Charles WITTEBROODT
<b>Directeur de thèse :</b>	Vincent LAGNEAU - Mines Paristech
<b>Ecole doctorale :</b>	Paris VI – Géosciences et ressources naturelles – ED 398
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / CEA / BEL V

In France, the Callovo-Oxfordian clayey rocks are proposed to host a deep geological facility to confine high- and intermediate- level radioactive wastes. However, some of these wastes are capable of releasing large amount of soluble salts. Such a generation may induce local physicochemical imbalance within the disposal area, changing the containment properties of the host-rock. Such impacts can be estimated at lab scale, which can be further extrapolated for larger time and space scales using chemistry transport codes. However, such an extrapolation requires to check the "Ability of chemistry transport codes to tackle chemical perturbations induced by saline plumes." Therefore, our objective is twofold: i) experimentally determine impact of physicochemical phenomena on neutral/charged porous systems and ii) numerically extrapolate these results for longer time and space scale to test the robustness of chemistry transport codes used in our study.

To meet these objectives, firstly we used a simple neutral porous matrix, such as chalk, in which precipitation phenomena were studied. To induce precipitation in chalk matrix, we used a classical through diffusion cell. The precipitated minerals in our study were barite and gypsum respectively. Barite represented a slow kinetic and gypsum represented a fast kinetic precipitation reaction. The impact of these precipitations on diffusion of radioactive elements was determined in a two-step approach. 1) Firstly, we determined the effective diffusion coefficient  $D_e$  of tritiated/deuterated water tracer through intact chalk sample. 2) We determined  $D_e$  of the same tracer after precipitation mechanism. At the end of the experiment, the chalk sample was finally subjected to post-mortem analysis such as FEG-SEM observations, abrasive peeling and successive sulfate leaching. These analyses were necessary to validate the experimentally-determined mass balance calculations.

In second part of our study, we are now reproducing these results using chemistry transport codes, such as HYTEC and CRUNCH Flow. At the end of simulations, the experimental and numerical results would be compared to assess two important parameters. 1) Can codes reproduce precipitation impact on porosity for simple chalk system? 2) Can codes reproduce the precipitation impact on diffusivity? The assessment of both of these parameters would hence determine the robustness of these codes for simple systems.

In addition to this investigation of a neutral porous medium, we are beginning the study of the impact of barite precipitation on the confinement properties of two negatively charged compacted porous systems, kaolinite and illite which are two types of clay minerals.

➤ Mardi 28 mars

16 h45

Salle Bord de mer

## SESSION PLÉNIÈRE

### **L'iode : de l'enceinte à l'environnement**

**Président : Jean-Christophe SABROUX**

Expert-Senior Physico-chimie et métrologie des polluants  
Pôle sûreté nucléaire

**Houssam HIJAZI**, Réactivité chimique des aérosols d'iode en conditions accidentelles dans un réacteur nucléaire.

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

**Geoffrey PELLERIN**, Quantification des vitesses de dépôt sec et identification des processus d'émission des aérosols sur des couverts naturels.

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



## Sujet de la thèse :

Réactivité chimique des aérosols d'iode en conditions accidentelles  
dans un réacteur nucléaire

Doctorant :

Houssam HIJAZI

Date du début de la thèse :

14 / 10 / 2014

Laboratoire :

PSN-RES / SAG / LETR

Tuteur de thèse :

Laurent Cantrel

Directeur de thèse :

J.F. Paul – UCCS Lille1

Ecole doctorale :

Université Sciences et Technologies – Lille1

Financement de thèse :

IRSN

Understanding the chemical behavior of metallic iodide aerosols in severe accident conditions is of great importance as it has been shown that CsI aerosol, deposited on a steel surface, is rapidly and almost entirely oxidized into gaseous molecular iodine under air at medium temperature as illustrated in figure 1. At present time, the experimental data are limited and focused only on CsI.

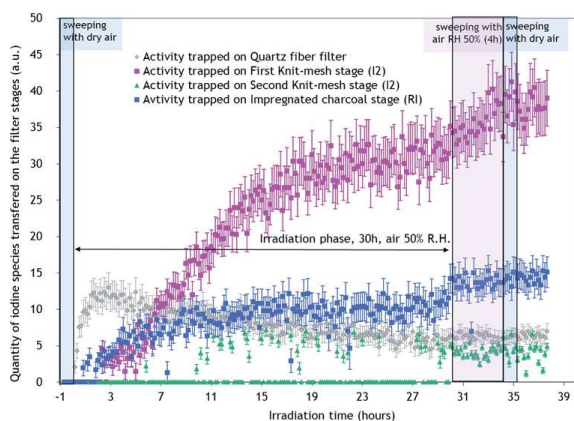


Figure 1. Result of irradiation test of CsI aerosols deposited on steel coupon, RH of 50%. In pink, release of I<sub>2</sub>(g) is measured as function of time.

water on both systems is non dissociative (no rupture of O-H bond) and that the adsorption is weak; The main interactions are an hydrogen bond between H-I on CsI and the formation of a weak O-Ag bond on AgI.

Various possible mechanisms leading to the formation of I<sub>2</sub> molecule starting by CsI and AgI have been investigated. We noticed that removing I<sub>2</sub> simply from both surfaces is not possible since the reaction is very endothermic. It is mandatory to oxidize the surfaces before removing I<sub>2</sub>. The OH radical is used as oxidant since it is produced from water radiolysis. In presence of this strong oxidizing species (Figure 2), the I<sub>2</sub> released is an exothermic process and the kinetic of the reaction is fast. The activation energy of formation of I<sub>2</sub> is about 1,0 eV for both surfaces.

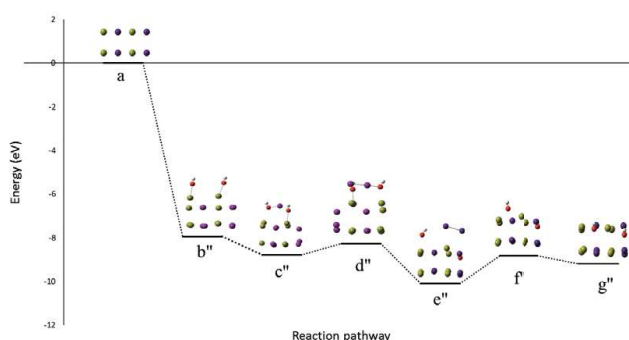


Figure 2. reaction pathway leading to the formation of I<sub>2</sub> starting CsI crystal after oxidizing the surface two times with two OH° radicals.

The objective of my PhD is to identify the mechanism leading to the oxidation of CsI into I<sub>2</sub>(g) AgI under radiolysis or in air-steam atmosphere. Study will also be extended to AgI aerosol (experimental data are expected end of 2017), also formed in SA conditions, which is quite different in nature being non soluble with respect to CsI. Ab initio chemical studies are performed at the molecular level, within the Density Functional Theory (DFT) formalism, using the periodic quantum software VASP.

We started our work by systemic studies of low index surface stability for both CsI and AgI particles to determine the nature and composition of aerosol surfaces. In a second step, we studied the reactivity by adding water molecules on the stable surfaces. We conclude that adsorption of

From CsI which is soluble, another way of formation of I<sub>2</sub> is a dissolution of I<sup>-</sup> into the water liquid layer present at the surface of the aerosol and next the well-known oxidation of I<sup>-</sup> into I<sub>2</sub> in the liquid phase next follows by I<sub>2</sub> transfer towards the gas phase.

The perspectives are to proposed other possible formation of I<sub>2</sub>(g), involving other types of oxidants such as O<sub>2</sub>(g). Finally, the results will be used to build some modelling which include the complexity of iodine aerosols present in the nuclear containment building. These models will be later implemented in the accident source term evaluation code ASTEC.

## Sujet de la thèse :

## Modélisation de l'interaction iode-aérosol en atmosphère

Doctorant :	Camille FORTIN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR
Tuteur de thèse :	Frédéric COUSIN et Patrick LEBÈGUE - PC2A
Directeur de thèse :	Florent LOUIS - PC2A / Valérie FÈVRE-NOLLET - PC2A
Ecole doctorale :	Université Lille 1 - SMRE
Financement de thèse :	Lille 1 / IRSN

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

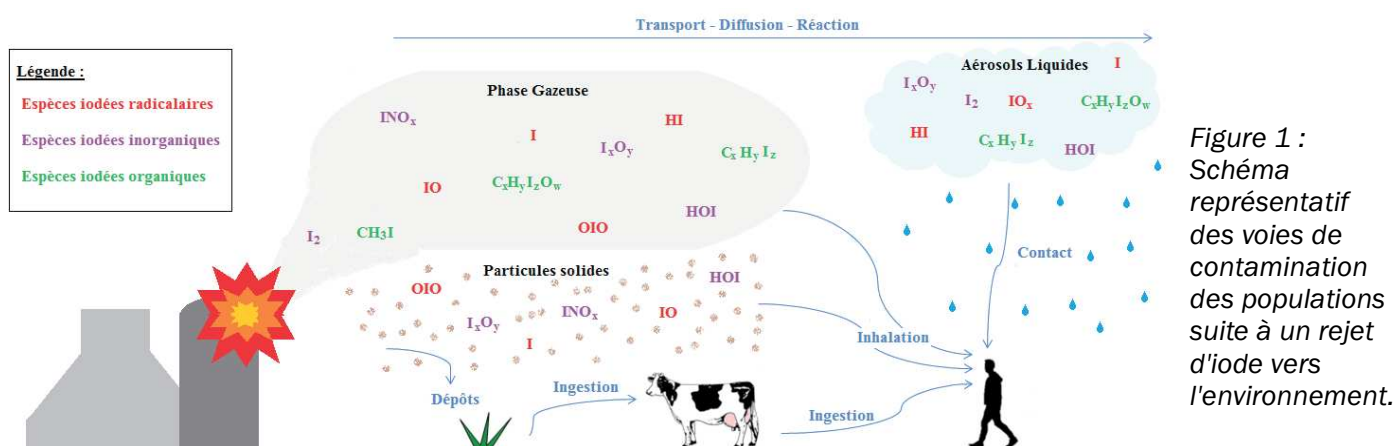


Figure 1 : Schéma représentatif des voies de contamination des populations suite à un rejet d'iode vers l'environnement.

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

Une synthèse des données disponibles dans la littérature concernant les réactions iode-aérosols a été réalisée qui a permis d'identifier différentes voies réactionnelles et qui a mis en évidence des incertitudes sur les paramètres cinétiques. Un nouveau mécanisme réactionnel a été postulé dont les tendances ont été analysées sur l'évolution de la spéciation chimique de l'iode dans un compartiment atmosphérique modèle de composition et de conditions constantes. Ces tendances dans le compartiment modèle seront étendues à des conditions réelles modélisées en 3D.

En parallèle une approche par chimie théorique est utilisée pour déterminer les paramètres cinétiques jugés incertains ; ainsi l'étude de la réaction de l'atome d'iode avec le peroxyde d'hydrogène a été réalisée et sera présentée.

En fin de thèse le comportement de ce mécanisme réactionnel amélioré par ces étapes sera à nouveau testé sur le compartiment atmosphérique modèle puis le mécanisme sera intégré aux modèles standards de chimie-transport Polair3D du CERE (Centre d'enseignement et de recherche en environnement Atmosphérique) et Chimère (LMD / INERIS / LISA) pour des études en conditions réelles.

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

## Sujet de la thèse :

## Quantification des vitesses de dépôt sec et identification des processus d'émission des aérosols sur des couverts naturels

Doctorant :	Geoffrey PELLERIN
Date du début de la thèse :	13 / 11 / 2014
Laboratoire :	PRP - ENV / SERIS / LRC
Tuteur de thèse :	Denis MARO
Directeur de thèse :	Evelyne GEHIN /CERTES et Denis MARO
Ecole doctorale :	Université Paris-Est Sciences Ingénierie et Environnement
Financement de thèse :	IRSN

Lors de rejets chroniques ou accidentels, des aérosols radioactifs peuvent être émis sous forme de particules ou de gaz par les installations puis être soumis aux processus atmosphériques dont le dépôt par temps sec. Après dépôt, ces aérosols radioactifs peuvent être remis en suspension principalement sous l'action du vent. Des incertitudes, pouvant aller jusqu'à plusieurs ordres de grandeur, existent sur les processus de dépôt et de remise en suspension des radionucléides sous forme particulaire.

Dans ce contexte, la thèse a pour premier objectif la quantification de la vitesse de dépôt par temps sec des aérosols sur couvert naturel pour une gamme granulométrique allant de 1,5 nm à 1,2  $\mu\text{m}$  (il n'existe pas de donnée *in situ* pour les particules inférieures à 10 nm) et en fonction des paramètres micrométéorologiques. Le second objectif est l'identification des processus de remise en suspension de particules primaires (bioaérosols : bactéries, champignons...) et secondaires (issues de diverses réactions au sein de l'atmosphère comme la conversion gaz/particules).

Les résultats obtenus et les connaissances acquises serviront à l'amélioration de la caractérisation des transferts des radionucléides dans l'environnement et vers l'homme.

Pour répondre à ces objectifs, différentes méthodes ont été développées et mises en œuvre durant quatre campagnes expérimentales, sur une prairie du site INRA de Lusignan. Pour la mesure des vitesses de dépôt par temps sec en fonction de la taille des particules, 3 méthodes différentes ont été utilisées : (1) la méthode du gradient pour la fraction libre du  $^{214}\text{Po}$  (particules de 1,5 nm) ; (2) la méthode par eddy covariance pour l'aérosol atmosphérique (particules de 2,5 nm à 1,2  $\mu\text{m}$ ) ; (3) la méthode de dépôt d'un aérosol de fluorescéine (particules de 0,5  $\mu\text{m}$ ). Des flux d'émission de bactéries ont pu être calculés par la méthode du gradient avec deux bioimpacteurs Andersen 1 étage ; un granulomètre SMPS a été utilisé pour observer les épisodes de nucléation des particules secondaires. La figure 1 présente les résultats acquis au cours de l'ensemble des campagnes expérimentales : pour la première fois, des vitesses de dépôt sec, *in situ*, de particules nanométriques ont été obtenues.

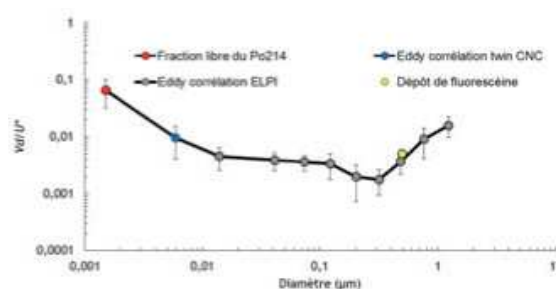


Figure 1 : Vitesse de dépôt par temps sec, en condition neutre et stable, ( $V_d$ ) normalisée par la vitesse de frottement ( $U^*$ ) et moyennée pour les campagnes DEPECHEMOD 1 à 4 en fonction du diamètre des particules.

## Sujet de la thèse :

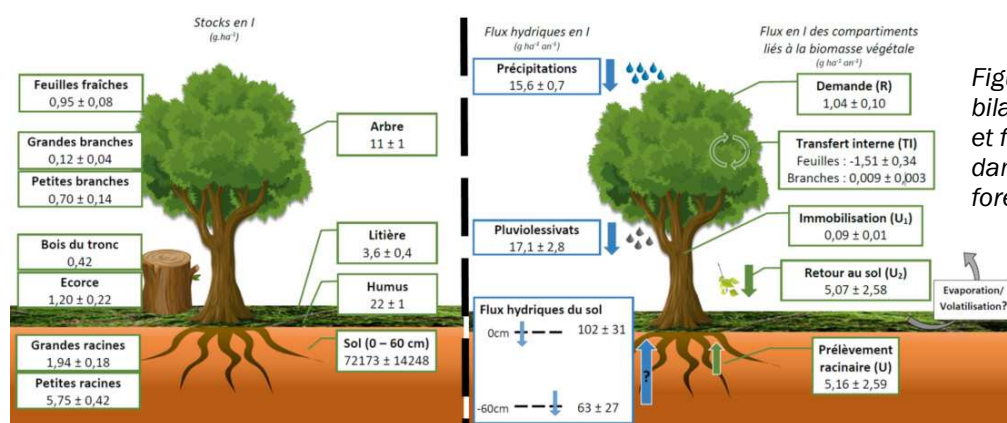
## Cycle biogéochimique de l'iode en écosystème forestier

Doctorant :	Marine ROULIER
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2015
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / L2BT
Tuteur de thèse :	Frédéric COPPIN
Directeur de thèse :	Florence PANNIER et Isabelle LE HECHO IPREM / LCABIE – UPPA / CNRS, UMR 5254
Ecole doctorale :	Université de Pau et des Pays de l'Adour, Ecole Doctorale des Sciences Exactes (ED211)
Financement de thèse :	IRSN / Région Aquitaine

Cette étude fait partie du projet AMORAD axé sur l'amélioration des modèles de prévision de la dispersion des radionucléides et de l'évaluation de leur impact au sein de l'environnement.

L'iode, élément trace présent naturellement dans l'écorce terrestre, est présent sous forme de l'isotope stable  $^{127}\text{I}$  (99,99%) et de  $^{129}\text{I}$  (0,01%) seul radio-isotope à vie longue de l'iode (période radioactive :  $15,7 \cdot 10^6$  ans).  $^{129}\text{I}$  est également présent dans les déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Sa mobilité combinée à sa longue demi-vie font de  $^{129}\text{I}$  un radionucléide potentiellement préoccupant pour la gestion à long terme et l'évaluation d'impact du stockage de déchets radioactifs ainsi qu'en cas de libération accidentelle majeure. Les forêts, dont la surface couvre près du tiers du territoire français et européen, sont à considérer dans le cas de la dissémination environnementale de l'iode. Du fait de leur forte capacité de recyclage des éléments qui peut modifier leurs formes chimiques (spéciation) et leur redistribution liée au cycle de la matière organique, les forêts pourraient influencer le cycle global de  $^{129}\text{I}$  avec des processus de transfert semblables à ceux de l'isotope stable.

Les objectifs de cette thèse sont de faire le lien entre le cycle de l'iode et la dégradation de la biomasse forestière dans les couches de sol et d'humus en identifiant la distribution et la spéciation des composés iodés à différents stades de sa minéralisation. Pour y répondre, une première partie de la thèse s'est attachée à étudier la distribution de l'iode entre les compartiments de l'écosystème forestier à travers la surveillance *in situ* de  $^{127}\text{I}$  réalisée sur le site forestier de Montiers (Ope - Andra). Le cycle global de l'iode stable a été caractérisé en termes de stocks dans les principaux compartiments de l'écosystème forestier afin d'en déduire les flux annuels et le bilan entrées-sorties à l'aide de la mise en œuvre de modèles conceptuels (Figure 1). La deuxième partie de la thèse se focalisera sur une meilleure compréhension de l'impact de la dégradation de la matière organique sur la modification de la mobilité et de la (bio)disponibilité de l'iode dans le sol.



➤ **Mardi 28 mars**  
à 20 h 45 ➤ Salle Bord de mer

## Quelles perspectives pour nos chercheurs de demain ?

Numérique et big data, bouleversement du rapport au savoir, mutations du travail, aucun secteur d'activité ne peut se développer sans s'appuyer sur les dernières avancées scientifiques, l'innovation, le développement des compétences des citoyens et des professionnels.

L'évolution du monde est extrêmement rapide, ainsi entre 2000 et 2014 l'équivalent des avancées scientifiques et techniques effectuées sur l'ensemble du XXe siècle a été réalisé et le sera à nouveau entre 2015 et 2021 ! Dans une société où une part toujours plus importante des citoyens maîtrise les savoirs les plus actuels et interroge en permanence les modes de fonctionnement de la recherche, nous tenterons d'identifier les tendances et les défis pour la recherche de demain.

Afin d'initier le débat, d'anciens doctorants formés à l'IRSN témoigneront de leur parcours et des évolutions en amorce seront identifiées à travers les derniers textes législatifs. Les doctorants apporteront au débat leur perception de la recherche et des pratiques émergentes.

### Intervenants extérieurs à confirmer :

- **Pierre-Yves MESLIN**  
^ Maître de conférences,  
Institut de recherche en astrophysique et planétologie  
de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- **Sylvain DAVID**  
Directeur Adjoint Scientifique IN2P3 / CNRS.

➤ Mercredi 29 mars

08 h 30

Salle Bord de mer

## SESSION PARALLÈLE

### **Effets des faibles doses chroniques**

**Président : Patrick LALOI**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Caroline ARCANJO**, Évaluation des modes d'actions toxiques de l'eau tritiée (HTO) sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*).

**Dalila LEBSIR**, Toxicologie de l'iode stable : étude *in vivo* des effets biologiques associés à une prophylaxie répétée par l'iode stable.

**Marie TRIJAU**, Étude à différentes échelles des mécanismes d'action toxique des radiations ionisantes chez *Daphnia magna*.

**Cécile DUBOIS**, Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants : de l'ADN aux protéines.

## Sujet de la thèse :

**Évaluation des modes d'actions toxiques de l'eau tritiée (HTO)  
sur les stades de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*)**

Doctorant :	Caroline ARCANJO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LECO
Tuteur de thèse :	Béatrice GAGNAIRE
Directeur de thèse :	Christelle ADAM-GUILLERMIN - IRSN
Ecole doctorale :	Aix-Marseille / Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN/EDF

En France, le tritium sous forme d'eau tritiée (HTO) est principalement rejeté, en fonctionnement normal, par les centres nucléaires de production d'électricité et les centres de traitement des combustibles. De plus, la future utilisation de la fusion thermonucléaire (ITER) sera susceptible d'accroître son rejet dans l'environnement. Il est donc essentiel d'évaluer son impact sur les écosystèmes, notamment aquatiques, qui sont des milieux récepteurs des effluents liquides des centrales.

Cette thèse vise à évaluer les modes d'action toxique de l'HTO sur les stades de développement précoce du poisson zèbre. Le premier axe vise à caractériser la bioaccumulation du tritium. Il est indispensable pour déterminer la dose absorbée, mais délicat pour l'HTO dont les cinétiques d'échange sont rapides. Le second axe se focalise sur les effets biologiques à l'échelle individuelle et moléculaire.

Pour réaliser ces objectifs, des œufs ont été exposés à deux concentrations d'HTO ( $1,22 \cdot 10^5$  et  $1,22 \cdot 10^6$  Bq.mL<sup>-1</sup>) puis échantillonnés à différents stades de développement. Ces concentrations correspondent à des débits de dose de 400 et 4000  $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  pour lesquels des effets délétères sont susceptibles d'apparaître chez les jeunes poissons. Afin d'évaluer la bioaccumulation, un protocole de préparation des échantillons reproductible a été validé. Les paramètres développementaux ont été suivis et une analyse de l'ultrastructure du muscle a été réalisée (MET). Les dommages à l'ADN ont été évalués et une analyse du transcriptome réalisée.

Les premiers résultats montrent une bioaccumulation significative et rapide (dès 1h) du tritium atteignant un plateau après 24h (facteurs de concentration de l'ordre de 0,7 et 0,5). Les analyses morphologiques montrent des effets significatifs mais transitoires et les analyses histologiques quelques altérations musculaires. Aucun effet n'a été montré sur la survie et le taux d'éclosion. L'évaluation des dommages à l'ADN semblent indiquer la mise en place de mécanismes de protection à seuil contre les effets de l'exposition. Ces résultats seront complétés via la détection de cassures double brin de l'ADN ( $\gamma\text{-H2AX}$ ). L'analyse du transcriptome en cours permettra, après approfondissement, de mettre en évidence les gènes et les grandes fonctions impactées par l'exposition au tritium. Ces résultats pourront être comparés avec les réponses analogues observées chez des larves exposées à de l'uranium appauvri ou une irradiation gamma externe.

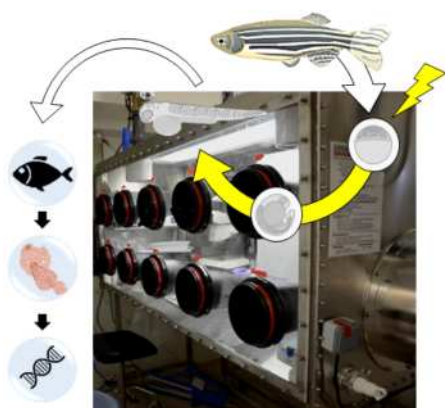


Figure 1 : schéma illustrant les différents stades de vie utilisés ainsi que les différentes échelles sélectionnées pour évaluer les effets de la contamination à l'HTO. La photo représente la boîte à gants dans laquelle nous réalisons les contaminations.

**Sujet de la thèse :****Toxicologie de l'iode stable : étude des effets biologiques  
associés à une prophylaxie répétée par l'iode stable**

<b>Doctorant :</b>	<b>Dalila LEBSIR</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SRBE / LRTOX</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Maâmar SOUIDI, Anick PECH (DAPSA / PCA)</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Maâmar SOUIDI - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Paris-Sud / ED569 Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR / RSNR Priodac</b>

L'iode 131, émis lors d'accident nucléaire, peut être responsable en l'absence de mesures de protection adaptées, de l'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde, en particulier chez les jeunes enfants. Cette conséquence peut néanmoins être limitée par l'ingestion de comprimés d'iodure de potassium (KI). L'objectif de cette prophylaxie est de saturer la glande thyroïde par de l'iode non radioactif et d'éviter ainsi la fixation des iodes radioactifs. Toutefois, l'accident de Fukushima a montré que la doctrine actuelle de l'iode qui consiste en une prise unique, ne peut protéger de manière satisfaisante les populations exposées à des rejets répétés d'iodes radioactifs. Ainsi, on se trouve démuné en cas d'exposition prolongée, vu l'absence d'un schéma prophylactique réitéré validé, et le déficit de connaissances toxicologiques associées aux effets de l'administration répétée du KI. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse qui fait partie du projet PRIODAC : PRophylaxie répétée par l'IODe stable en situation ACcidentelle.

L'objectif de la thèse est de déterminer les effets biologiques délétères liés à l'administration répétée du KI.

Dans cette étude, des rats adultes ont reçus du KI à 1 mg/kg/24h [1] ou de l'eau pendant 1, 4 ou 8 jours. Les rats des groupes 1 et 4 jours ont été euthanasiés 24 h après la dernière administration, ceux du groupe 8 jours ont été euthanasiés 24 h, 48 h ou 30 jours après la dernière administration. Les urines et le sang ont été prélevés pour effectuer des dosages biochimiques, hormonaux et immunologiques. La thyroïde a été prélevée pour l'étude histologique, et l'évaluation de l'expression des gènes responsables du métabolisme de l'iode (effet Wolff-Chaikoff).

Les résultats montrent une absence de modification du taux circulant des hormones (TSH, T3L, T4L), et des paramètres biochimiques plasmatique et urinaire. En revanche, au niveau de la thyroïde un effet Wolff-Chaikoff séquentiel a été observé, avec une diminution dès 24h de l'expression de l'ARNm de NIS et de MCT8 (-58% and -26% respectivement), puis une diminution tardive à 8 jours de l'expression de l'ARNm de la TPO (-33%) ainsi qu'une augmentation de l'expression de l'ARNm de la PDS (+62%). A 30 jours après l'arrêt de la prophylaxie, l'expression des ARNm des gènes impliqués dans le métabolisme de l'iode au niveau de la thyroïde a été restaurée. Enfin, dans notre étude nous n'avons pas observé d'impact sur le taux plasmatique des anticorps antithyroïdiens (Anti-TPO et Anti-Tg) ainsi que sur l'histologie de la thyroïde.

En conclusion, cette étude de toxicologie chez un modèle animal adulte montre l'innocuité du KI à 1 mg/kg administré pendant 8 jours. Ces résultats très encourageants ont servi de données d'entrée [2] à la pharmacie centrale des armées pour la mise en œuvre des études de toxicologie en condition BPL qui devraient conduire à une évolution de l'AMM (Autorisation de Mise sur le Marché) du KI. En perspectives et afin de couvrir l'ensemble de la population à protéger, des modèles animaux représentatifs des différentes tranches d'âge et groupes de population concernés par la prophylaxie par l'iode stable seront étudiés et particulièrement pour les individus que sont *in utero*/fœtus et le postnatal pour lesquels la phase de développement et de croissance les rend particulièrement sensibles.

[1] rapport n° PRP-HOM/SDI/2016-10 : Étude pharmacologique du KI chez le rat adulte

[2] rapport n° PRP-HOM/SRBE/2016-00140 : Étude toxicologique du KI chez le rat adulte



## Sujet de la thèse :

Étude à différentes échelles des mécanismes d'action toxique des radiations gamma chez *Daphnia magna*

Doctorant :	Marie TRIJAU
Date du début de la thèse :	29 / 10 / 2015
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LECO
Tuteur de thèse :	Frédéric ALONZO
Directeur de thèse :	Jean-Christophe POGGIALE - Université Aix-Marseille
Ecole doctorale :	Université Aix-Marseille / ED 251-Sciences de l'environnement
Financement de thèse :	IRSN

L'évaluation du risque écologique lié aux radionucléides dans l'environnement nécessite de mieux comprendre les mécanismes de la radiotoxicité afin d'en prédire les conséquences à long terme sur les écosystèmes.

Le microcrustacé d'eau douce *Daphnia magna* est particulièrement adéquat pour étudier l'apparition d'altérations de l'ADN héréditaires lors d'une irradiation gamma sur plusieurs générations, et leurs répercussions sur la survie, la croissance et la reproduction. Ma thèse s'intéresse au rôle de la méthylation de l'ADN, mécanisme épigénétique participant à la régulation de l'expression des gènes, sur la réponse biologique aux radiations gamma. Les radiations ionisantes induisent des modifications de la méthylation de l'ADN chez la souris, ce qui pourrait conduire à une perturbation du fonctionnement de l'organisme. Ce mécanisme reste toutefois à confirmer chez les invertébrés.

Un volet expérimental a testé l'apparition et la transmission de modifications des profils de méthylation de l'ADN de daphnies exposées aux radiations gamma (génération F0) à leur descendance non exposée (génération F1, F2, F3) (Fig.1). Les premiers résultats montrent à l'échelle de l'organisme une réduction significative de la fécondité chez les daphnies exposées au débit de dose de  $41,3 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ , et une absence d'effet dans leur descendance dès la génération F1. Une technique de séquençage de l'ADN au bisulfite a été utilisée afin de détecter les différences de profils de méthylation de l'ADN des daphnies exposées et leur transmission à la descendance. D'après les premiers résultats, plus de 700 gènes présentent un taux de méthylation significativement différent du témoin, quel que soit le débit de dose.

Le volet modélisation vise à prédire, de manière robuste, la réponse des daphnies aux radiations gamma sur le long terme à l'aide du modèle mécaniste DEBtox (Dynamic Energy Budget in toxicology). L'identification des modes d'action métaboliques vraisemblablement impliqués dans la radiotoxicité (coût accru de l'œuf, coûts accrus de croissance et de maturation) permet de lier l'apparition des effets aux dommages moléculaires accumulés et transmis au fil des générations. L'approche bayésienne permet une meilleure estimation des paramètres du DEBtox, ainsi qu'une meilleure quantification de leurs incertitudes, en prenant en compte l'ensemble des données expérimentales et des connaissances a priori du modèle.

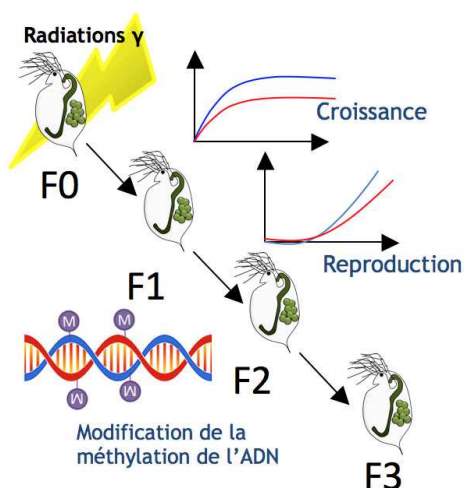


Fig.1 : La partie expérimentale associe une mesure des effets à l'échelle de l'organisme (croissance, reproduction..) à une mesure des modifications de la méthylation de l'ADN sur trois générations de daphnies après l'irradiation en F0.

## Sujet de la thèse :

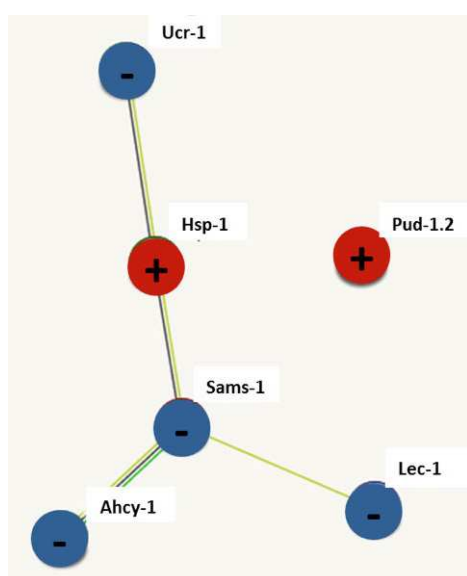
**Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants  
chez *Caenorhabditis elegans* : de l'ADN aux protéines**

Doctorant :	Cécile DUBOIS
Date du début de la thèse :	17 / 11 / 2014
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LECO
Tuteur de thèse :	Sandrine FRELON- Catherine LECOMTE
Directeur de thèse :	Simon GALAS – Université de Montpellier
Ecole doctorale :	Sciences Chimiques et Biologiques pour la Santé, Montpellier
Financement de thèse :	IRSN

Pour mieux comprendre les effets écotoxiques des rayonnements ionisants, il est nécessaire de caractériser les mécanismes moléculaires associés. Récemment, il a été montré chez le nématode *C.elegans* que le nombre de descendants par individu diminue à partir de 3.3 Gy après irradiation chronique. Après irradiation aiguë, cet effet n'est observé qu'à partir de 30 Gy et est associé à une baisse du taux d'éclosion. La modulation de l'expression des protéines ainsi que leur oxydation (*i.e.* carbonylation, pouvant entraîner une perte de leur fonctionnalité) après irradiation, pourraient expliquer les effets observés à l'échelle de l'individu. Ce projet de recherche a pour objectifs de 1) caractériser l'implication des modifications protéiques (modulation de leur expression, oxydation) dans les effets observés sur la reproduction après irradiation chronique ou aiguë et 2) déterminer si ces modifications peuvent être des biomarqueurs d'effet sensibles.

L'expression différentielle des protéines et la nature des protéines carbonylées, ont été étudiées après irradiation chronique ou aiguë de *C.elegans* à 3 doses cumulées (0.5, 1 et 3,3 Gy). Après irradiation, les échantillons biologiques ont été soumis à une extraction protéique, un marquage des carbonyles et une séparation protéique par électrophorèse 2D. Les spots d'intérêt ont été analysés par spectrométrie de masse.

Pour une dose de 3,3Gy, l'étude du carbonylome a montré que 7 protéines sont sur-carbonylées après irradiation aiguë, et, à la fois sur-exprimées et sous-carbonylées après irradiation chronique. Parmi elles, 3 sont nécessaires au développement de la lignée germinale, et 4 au développement embryonnaire. Ces résultats pourraient en partie expliquer les différences d'effets observés sur la reproduction après irradiation chronique vs aiguë. Afin de tester la sensibilité du marqueur d'expression des protéines, l'étude du protéome a été étendue à 0.5 et 1Gy où les effets



sur la reproduction ne sont pas visibles. A ces doses, 4 des 5 protéines impliquées dans le développement embryonnaire sont sous-exprimées après irradiation chronique (schéma 1), ce qui pourrait expliquer pourquoi l'impact sur le nombre de descendants est plus important pour ce mode d'irradiation. Ces résultats montrent que des changements au niveau protéique interviennent en amont des dommages physiologiques et pourraient être des marqueurs pertinents pour l'évaluation de la radiotoxicité.

*Schéma 1 : Résultats de l'étude comparée aiguë vs chronique (0.5 et 1 Gy) sur l'expression différentielle des protéines (ratio > à 1.5 et p.valeur < 0.05). Protéines sur- (+) ou sous- (-) exprimées. L'épaisseur des traits indique la force du support de données bibliographiques. Ucr-1, sams-1, ahcy-1, lec-1 et hsp-1 sont des protéines impliquées dans le développement embryonnaire de *C. elegans* ; le rôle de Pud 1.2 n'est pas connu à ce jour.*



**➤ Mercredi 29 mars**

08 h 30

Salle Miajou Labe

**SESSION PARALLÈLE****Flamme et incendie****Président : Joachim MISS**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Romain GROSSEUVRES**, Analyse de propagation de flamme hydrogène / air / vapeur en milieu confiné.**Roberto CARUSO**, Analyse de propagation de flamme hydrogène-air-vapeur en présence de gouttes d'eau.**Aryadeep CHAKRABORTY**, Étude de l'effet des produits de radiolyse sur le comportement des recombineurs autocatalytiques passifs (RAPs) et des moyens de prévention de leur inflammation.**Maxime MENSE**, Étude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée.**David ALIBERT**, Étude de la pyrolyse de matériaux en feu soumis à des régimes de sous-ventilation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé.

**Sujet de la thèse :****Analyse de propagation de flamme Hydrogène / air / vapeur en milieu confiné**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Romain GROSSEUVRES</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 11 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>IRSN / PSN-RES / SAG / BPhAG - CNRS / ICARE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Ahmed BENTAÏB</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Nabiha CHAUMEIX – CNRS/ICARE</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Ecole doctorale de l'université d'Orléans</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/CNRS</b>

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des études concernant les accidents graves dans les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) liés au risque hydrogène. Ce risque est défini comme étant celui de la perte d'intégrité de l'enclume de confinement ou de détérioration des systèmes de sécurité, suite à une combustion d'hydrogène libéré lors de l'oxydation des métaux contenus dans le cœur du réacteur par de la vapeur d'eau.

Une flamme de prémélange peut se propager suivant deux modes : un mode lent nommé déflagration, où la vitesse des gaz frais par rapport au front de flamme est subsonique, et un mode rapide nommé détonation, où la vitesse est supersonique. En fonction de la géométrie interne du milieu où se propage la flamme, de la composition du mélange initial et du niveau de turbulence, une déflagration peut subir des phénomènes d'accélération ou au contraire de décélération voire d'extinction. Ces phénomènes ne sont pas parfaitement compris et des études expérimentales et de modélisation complémentaires sont nécessaires.

Les travaux de cette thèse visent à caractériser la propagation de flammes hydrogène/air/vapeur en milieu confiné dans des conditions représentatives de cas d'accidents graves en réacteur à eau pressurisée. Ils visent notamment à évaluer un critère d'accélération de flamme basé sur les propriétés du mélange inflammable initial (paramètres fondamentaux des flammes de prémélange) ainsi que la géométrie où se propage la flamme.

Durant les deux premières années de cette thèse, les paramètres fondamentaux ( $S_L^0$ ,  $L_B$ ,  $E_a$ ,  $\beta$ ) des flammes d'intérêt à cette étude ont été mesurés et calculés au travers de la détermination de vitesse de flamme laminaire en bombe sphérique. En parallèle, une nouvelle installation (ENACCEF-II) permettant les études d'accélération de flamme a été mise en place. Les premières études ont concerné les propagations de flamme hydrogène/air. Les impacts du niveau de turbulence et de la concentration en hydrogène dans le mélange initial ont été investigués. Les prochaines études concerneront l'impact de la température ainsi que de la concentration en vapeur d'eau. Toutes ces données expérimentales seront ensuite comparées au critère d'accélération de flamme afin de le vérifier.

## Sujet de la thèse :

## Analyse de propagation de flamme hydrogène-air-vapeur en présence de gouttes d'eau

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

Water Spray Systems, are widely used to decrease the containment building pressure and to avoid a fission products leak, in case of Severe Accident in Nuclear Power Plant. In case of severe accident, hydrogen may be produced and released inside the containment. Water Spray Systems homogenize the hydrogen distribution and may lead to "de-inertization" of the mixture through the condensation of steam on water droplets. If the mixture is opportunely ignited, it may lead to a dangerous regime of combustion: flame acceleration that could transit to detonation that will challenge and compromise the containment integrity. For what concerns the propagation of a hydrogen-air-vapor Flame in presence of water droplets, the state of art doesn't allow to quantify clearly in what measures and in what conditions, the use of Water Spray (WS) can intensify the severity of the explosion.

Experimental Data will be collected through 2 Facilities: ENACCEF 1 and 2 which are two vertical setups highly instrumented with Photomultipliers, Pressure Sensors and equipped with obstacles with different shapes and dimensions. These Vertical Acceleration Tubes are equipped with windows which allow using Advanced Optical Diagnostics: Schlieren Technique, Tomography and Particle Image Velocimetry.

Preliminary Calculations and 1D Flames Simulations are conducted by using COSILAB software. The goal was to obtain basic information about Hydrogen Laminar Flame Thickness and Laminar Flame Speed which allow defining the sprays's features suitable for this study.

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

By considering the Experimental set up which will be used to study the flame in presence of droplets, it is necessary characterize the behavior of the spray in a vertical pipe. By using

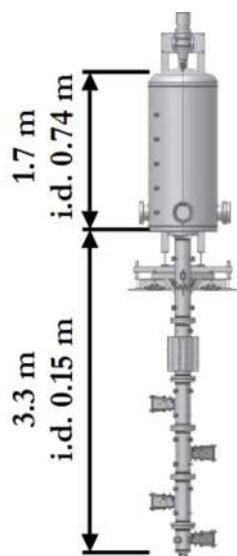


Figure 1. Schematic of ENACCEF experimental facility [1,2].

Laser Particle Diffraction, at different quote of the pipe, 5 nozzles are characterized during the injection phase in terms of: Volume Diameter trend, the Probability Density Function and the Cumulative Function.

By combining Information about the Optical Density and Light Scattering, the Spray Density for each injector, is characterized in qualitative terms.

The next step will be to employ the injector on the ENACCEF1 and 2 and to study the behavior of the Flame Propagation.

The perspective of this work is to enhance the knowledge about the effect of the variation of Spray's features on the flame dynamic to obtain information on how to design **efficiently** the safety spray system and thereby guarantee the Nuclear Safety.

**Sujet de la thèse :****Étude de l'effet des produits de radiolyse  
sur le comportement des recombineurs autocatalytiques passifs (RAPs)  
et des moyens de prévention de leur inflammation**

**Doctorant :** Aryadeep CHAKRABORTY  
**Date du début de la thèse :** 03 / 11 / 2014  
**Laboratoire :** PSN-RES/SAG/B2EGR & Forschungszentrum Juelich, Germany  
**Tuteur de thèse :** Ahmed BENTAIB & Dr. Ernst-Arndt REINECKE (Germany)  
**Directeur de thèse :** Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hans-Josef ALLELEIN,  
LRST, RWTH University, Aachen Germany  
**Ecole doctorale :** RWTH Aachen University, Germany  
**Financement de thèse :** Forschungszentrum Juelich, Germany and IRSN

---

During a severe accident like a Loss of Coolant Accident (LOCA) in a nuclear power plant, considerable amount of hydrogen and carbon monoxide may be produced due to various chemical reactions inside and outside the reactor vessel. The local or global concentration of the flammable gases inside the containment may exceed the ignition limit and induce combustion pressure loads which may threaten the containment integrity. Consequently, several European nuclear reactors have been equipped with Passive Autocatalytic Recombiners (PARs) in order to keep the local molar fraction of hydrogen below 10% to avoid flame acceleration, and the global molar fraction of hydrogen below 8% to avoid excessive pressure in case of combustion (French safety criteria ).



*Figure 1 Catalyst sheets recombining hydrogen.*

PARs convert hydrogen and carbon monoxide to steam and carbon dioxide, respectively, by means of catalytic surface reactions. The heat release due to the exothermic reactions on the platinum-coated catalyst sheets promotes an upward natural chimney flow inside the PAR box, supporting the efficient conversion process. However, high temperatures on the catalyst sheets may lead to gas-phase ignition of the mixture, which may spread outside the PAR box causing possible damages to reactor containment safety components.

The PhD aims at identifying the key phenomena leading to gas-phase ignition, and at developing a suitable approach to prevent ignition by limiting the catalyst temperature while preserving efficient hydrogen conversion, a sufficient buoyancy-driven flow, and the robustness of the recombiner against catalyst deactivation. This work is performed in collaboration between the Severe Accidents Department at IRSN in France and the Institute for Nuclear Waste Management and Reactor Safety at Forschungszentrum Juelich (JÜLICH) in Germany.

A part of the first year of the PhD was invested to study the state of the art, especially by analysing the comprehensive database of OECD/NEA-THAI experiments in order to understand the mechanism of ignition. Simultaneously, to better understand the ignition process, dedicated experiments in forced flow condition were performed in the REKO-1 facility in the hydrogen laboratory at JÜLICH. The experimental results as well as conclusions from the THAI analysis are supported by numerical results from REKO-DIREKT code (JÜLICH) and SPARK code (IRSN). The first half of the second year has been invested in validating SPARK code, and developing it for new features. Based on the predictions of SPARK, the second half has been invested in performing experiments at Jülich with modified catalyst sheets, to successfully delay gas-phase ignition induced by catalysts. Furthermore, ignition characteristics of catalyst sheets under the effect of carbon monoxide and less oxygen in the atmosphere have been studied. Currently, experiments with PARs under natural flow conditions in the REKO-4 facility of FZJ are being performed. At the end of the PhD, a conclusive report summarizing the results will be submitted.

## Sujet de la thèse :

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

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

Lors d'un incendie dans un milieu mécaniquement ventilé, le développement du feu peut conduire à une sous-oxygénation du milieu réactionnel et, dans certains cas, à l'extinction du foyer. Pour certaines conditions de feu et de ventilation, des instabilités de combustion peuvent même apparaître. Ces dernières se traduisent par des fluctuations basses fréquences (BF) importantes des grandeurs caractéristiques de l'incendie. Ces phénomènes oscillatoires peuvent avoir un impact direct sur la sûreté des installations nucléaires en entraînant notamment une dégradation du confinement dynamique et une perte d'intégrité des équipements de sectorisation. Dans ce contexte, on se propose ici de présenter un ensemble de données à l'usage des modélisateurs, dans le but d'identifier et de caractériser les mécanismes physiques associés à ces instabilités.

L'étude expérimentale porte sur la combustion d'heptane dans une enceinte mécaniquement ventilée nommée NYX. Ce dispositif expérimental est un parallélépipède rectangle d'un volume de 1.875 m<sup>3</sup> (1.5x1.25x1m). Les parois, multicouches, sont composées d'une plaque d'acier et d'une plaque de silicate de calcium comprimé. Pour les essais présentés, nous avons fait varier le taux de renouvellement d'air dans l'enceinte, de 8 à 20h<sup>-1</sup>, et le diamètre du foyer est de 0.18m. Les données collectées concernent la température du gaz dans la flamme et dans l'enceinte, la concentration en CO, CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, le débit de ventilation à l'admission et à l'extraction, la perte de masse du combustible et la pression dans l'enceinte.

Les mesures obtenues mettent en évidence le phénomène oscillatoire sur le débit de pyrolyse, la pression des gaz dans l'enceinte, les concentrations en espèce chimique (CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>) et les températures du gaz. La Figure 1 montre les évolutions temporelles du débit de pyrolyse pour trois taux de renouvellement d'air, faisant apparaître des fréquences comprises entre 0.0146 et 0.0218 Hz (i.e. des périodes comprises entre 68 et 46 s).

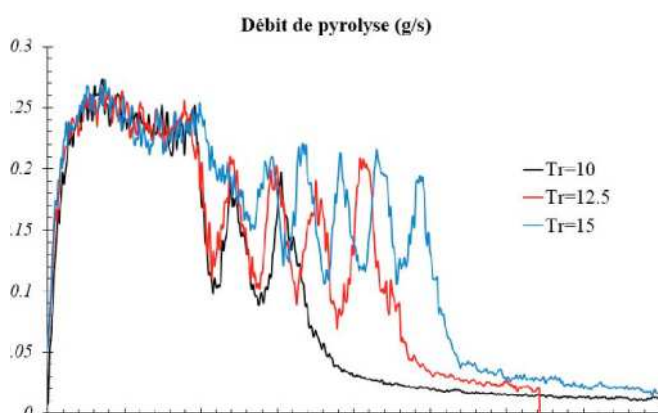


Figure 1 : Evolutions temporelles du débit de pyrolyse pour trois taux de renouvellement d'air pour un bac de 18 cm de diamètre.

Ce comportement oscillatoire de BF se traduit par un mouvement périodique de la flamme : celle-ci devient plus courte, se déplace hors du bac (sans décrochement), s'étire puis revient à la surface du bac. Les mesures montrent qu'en augmentant le taux de renouvellement, des oscillations haute fréquence (HF) s'ajoutent au régime basse fréquence. Pour des taux de renouvellement élevés, les fluctuations basses fréquences sont fortement affaiblies. Les travaux en cours ont pour objectif de mieux comprendre les mécanismes d'apparition de ces oscillations BF et ceux qui conduisent à l'extinction. Des expérimentations futures sont envisagées afin d'étudier les propriétés thermiques des parois et la position relative entre la bouche de ventilation et le foyer.

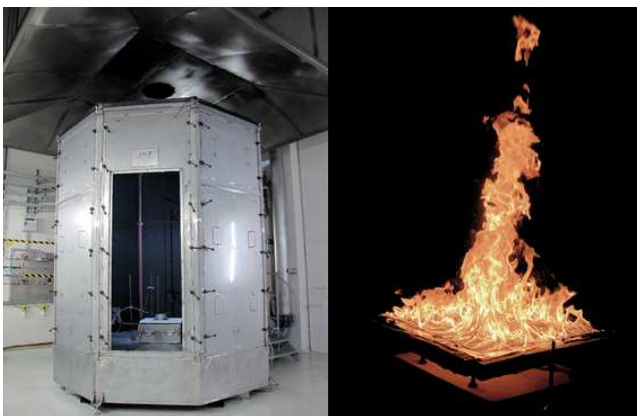


**Sujet de la thèse :****Étude de la pyrolyse de matériaux en feu soumis à des régimes de sous-ventilation contrôlée simulant des conditions environnementales réelles d'un foyer en milieu confiné/ventilé**

<b>Doctorant :</b>	<b>David ALIBERT</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>11 / 10 / 1990</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LEF</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Mickaël COUTIN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Bernard PORTERIE – IUSTI</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>AMU / ED 353 : Sciences Pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Université d'Aix-Marseille (AMU)</b>

---

Un incendie qui se déclare dans une installation nucléaire conduit le plus souvent à des feux dits confinés et sous-ventilés. Ces conditions environnementales couplées à la consommation d'oxygène de la combustion peuvent conduire au développement de l'incendie en milieu sous-oxygéné et le faible taux de ventilation du local va engendrer une accumulation des fumées. Cette viciation du milieu ambiant va modifier le rayonnement de la flamme vers la surface du combustible et influencer significativement le processus de pyrolyse. Par conséquent, il est important d'étudier l'influence du niveau d'oxygène ambiant sur les différents paramètres de combustion. Ces paramètres sont principalement le débit de pyrolyse, la production de suies et d'imbrûlés, le rayonnement de la flamme, sa température et sa forme. Le but de cette thèse est donc d'étudier expérimentalement les effets du niveau d'oxygène sur ces paramètres, et donc sur le développement d'un feu afin de valider et/ou améliorer les codes de calculs.



Pour ce faire, un dispositif expérimental appelé CADUCEE (Controlled Atmosphere Device for Unburnt and Carbon Emission Evaluation) a été mis au point à l'IRSN. Ce dispositif permet de réaliser des feux de moyenne échelle tout en contrôlant le niveau d'oxygène ambiant grâce à un mélange air/azote. Grâce à la mise en place d'une métrologie adaptée, CADUCEE permet de répondre parfaitement aux besoins de la thèse. Une première phase d'essais a permis de qualifier le dispositif

et la métrologie. Une campagne d'essais sur un combustible solide de type polymère thermoplastique (PMMA, polyméthacrylate de méthyle) a permis de montrer la dépendance des paramètres de combustion à la concentration en oxygène pour trois tailles d'échantillons données. Une seconde campagne expérimentale sur un combustible liquide (heptane) est en cours de réalisation.

Les perspectives de l'année en cours sont de finaliser la campagne d'essais sur les combustibles liquides, de valoriser les résultats obtenus par des publications dans des journaux et congrès et de rédiger le manuscrit de thèse. Il est également envisagé d'étudier la répartition des flux thermiques à la surface des échantillons de PMMA.

➤ Mercredi 29 mars

14 h 10

Salle Bord de mer

## SESSION PARALLÈLE

### **Irradiation, pathologie, traitement**

**Présidente : Jocelyne AIGUEPERSE**

Directrice de la radioprotection de l'homme  
Pôle radioprotection

**Jérémy LAVIGNE**, Changements phénotypiques des cellules endothéliales au cours du développement des lésions radiques pulmonaires.

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

**Amélie FRÉNEAU**, Étude de la signalisation et du devenir des dommages initiaux induits par un rayonnement X de basse énergie : comparaison avec un rayonnement X de référence.

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

**Sujet de la thèse :****Changements phénotypiques des cellules endothéliales au cours du développement des lésions radiques pulmonaires**

<b>Doctorant :</b>	Jérémy LAVIGNE
<b>Date du début de la thèse :</b>	20 / 10 / 2014
<b>Laboratoire :</b>	PRP-HOM / SRBE / L3R
<b>Tuteur de thèse :</b>	Agnès FRANCOIS
<b>Directeur de thèse :</b>	Agnès FRANÇOIS - IRSN
<b>Ecole doctorale :</b>	ED394 Physiologie, physiopathologie et thérapeutique - UPMC
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN

L'utilisation de la radiothérapie thoracique peut induire le développement de pneumonies aiguës et de fibroses pulmonaires. Actuellement, aucune solution n'existe pour traiter ou prévenir ces lésions. La dysfonction du système vasculaire est connue pour participer au développement de lésions radiques au niveau des tissus sains. Néanmoins, la tolérance à l'irradiation est fortement influencée par l'organisation tissulaire. Dans l'intestin, organisé en série, l'inactivation de PAI-1 (Plasminogen Activator Inhibitor-type 1) spécifiquement dans l'endothélium protège les souris de la fibrose radio-induite. Le premier objectif de ce projet est d'explorer le rôle de PAI-1 dans l'apparition de la fibrose radio-induite au niveau du poumon, organe organisé en parallèle, et de déterminer si l'organisation tissulaire peut avoir un impact sur les mécanismes de développement des lésions radiques.

L'irradiation de souris en thorax entier génère d'importantes modifications histologiques du parenchyme pulmonaire, avec un épaississement des septas alvéolaires, un infiltrat de neutrophiles et une accumulation de fibrine. On remarque également de la transition endothélium-mésenchyme précoce qui pourrait participer au développement des lésions radiques pulmonaires comme démontré dans l'intestin. L'analyse précise de différents paramètres tissulaires met en évidence qu'une délétion de PAI-1 spécifiquement dans l'endothélium induit une aggravation des lésions pulmonaires radio-induites à 2 et 13 semaines. L'inactivation de PAI-1 ne protège donc pas les animaux des dommages radiques pulmonaires et l'organisation tissulaire peut impacter le développement des lésions radiques.

L'organisation en parallèle permet d'envisager une tolérance du tissu pulmonaire à de fortes doses d'irradiation et de très fortes doses par fraction sur des petits volumes, c'est le principe de la radiothérapie en conditions stéréotaxiques utilisée pour le traitement des tumeurs pulmonaires de stade précoce. Grâce à l'acquisition du SARRP à l'IRSN, l'irradiation stéréotaxique avec des faisceaux millimétriques est possible chez la souris. Ainsi, des irradiations à une dose de 90 Gy avec un collimateur de 3x3 mm<sup>2</sup> sont réalisées chez la souris et les tissus sont prélevés à 2, 8 et 20 semaines après irradiation. Les premiers résultats montrent une perte totale des structures alvéolaires et un fort infiltrat inflammatoire au niveau de la zone irradiée. Un œdème est observable dans l'ensemble du poumon ipsilatéral deux semaines après irradiation. Des analyses histologiques, ARN et fonctionnelles sont en cours pour préciser ces observations. Nous testerons grâce à ce modèle la validité d'acteurs moléculaires identifiés dans l'intestin afin de mettre en évidence l'impact de l'organisation tissulaire sur les mécanismes de développement des lésions radiques aux tissus sains.

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

---

Doctorant :	Frédéric SOYSOUVANH
Date du début de la thèse :	14 / 09 / 15
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE / L3R
Tuteur de thèse :	Fabien MILLIAT
Directeur de thèse :	Fabien MILLIAT – IRSN
Ecole doctorale :	UPMC – Physiologie, physiopathologie et thérapeutique 2T (ED394)
Financement de thèse :	IRSN

---

Parmi l'arsenal disponible dans le traitement des cancers, la radiothérapie s'impose comme un outil indispensable. La radiothérapie est une méthode de traitement locorégional des tumeurs faisant appel à l'utilisation de rayonnements ionisants. Cependant, sa principale limite réside dans les atteintes radio-induites aux tissus sains. Le Laboratoire de Recherche en Radiobiologie et Radiopathologie (L3R) a identifié l'endothélium vasculaire (monocouche de cellules qui tapissent l'intérieur du vaisseau sanguin) comme étant un acteur important dans l'initiation, la progression et le maintien des lésions radio-induites. Sous l'effet des rayonnements, les cellules endothéliales sont activées, elles n'exercent plus leurs fonctions physiologiques et peuvent acquérir un phénotype sénescence. L'ensemble de ces phénomènes conduisent à la mise en place d'une dysfonction endothéliale radio-induite.

La sénescence cellulaire correspond à la perte des capacités prolifératives des cellules. Définitivement arrêtées dans le cycle, les cellules sénescence restent, néanmoins viables et métaboliquement actives. Elles présentent une morphologie altérée, sur-expriment des marqueurs tels que des inhibiteurs du cycle cellulaire (p16<sup>INK4A</sup> et p21) et la  $\beta$ -galactosidase. Enfin, elles adoptent un phénotype immunogène qui consiste en l'expression exacerbée de marqueurs antigéniques et la mise en place d'un sécrétome pro-inflammatoire.

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

Par une approche *in vitro* et à l'aide d'une analyse comparative de 6 lignées endothéliales humaines, nous avons déterminé que la lignée HUVEC (Human Umbilical Vein Endothelial Cells) est la plus pertinente en terme d'expression génique après irradiation à forte dose. Nous avons par la suite caractérisé le profil moléculaire dynamique de cette lignée (8 pas de temps, 9 doses) et avons également suivi la sénescence de cette lignée par immunocytochimie et cytométrie en flux. Ceci dans le but de décrire les mécanismes moléculaires à l'origine de la sénescence radio-induite de l'endothélium.

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

**Sujet de la thèse :**

**Étude de la signalisation et du devenir des dommages initiaux de l'ADN induits par un rayonnement X de basse énergie : comparaison avec un rayonnement X de référence**

<b>Doctorant :</b>	<b>Amélie FRÉNEAU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>07 / 09 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SRBE / LDB</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Gaëtan GRUEL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Laurence ROY - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Saclay / Structure et Dynamique des Structures du Vivant</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

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

Pour étudier cette différence, des cellules endothéliales primaires humaines ont été irradiées avec des rayons X à la dose de 5 Gy à des tensions de 40 kV, 220 kV et 4 MV. Les foci  $\gamma$ -H2AX et 53BP1, signalisation précoce des dommages de l'ADN, ont été étudiés jusqu'à 72 heures après l'irradiation à l'aide de marquages par immunofluorescence et d'une plateforme de microscopie. L'étude du devenir cellulaire (mortalité, capacité à se diviser), après irradiation à ces trois tensions, a été réalisée par vidéo-microscopie.

Pour une même dose de rayons X aux tensions de 40 kV et 220 kV, aucune différence dans la cinétique du nombre de foci  $\gamma$ -H2AX par noyau n'a été montrée. De plus, un blocage dans la reprise du cycle cellulaire a été observé durant les 72 heures après l'irradiation. En revanche, suite à une exposition à un rayonnement X de 4 MV une certaine proportion de cellules est capable de reprendre son cycle cellulaire. Une analyse comparative fine des foci de signalisation des dommages induits après une irradiation à une tension de 4 MV est en cours. Elle permettra d'identifier une signature moléculaire pouvant expliquer cette différence dans le devenir cellulaire.

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

---

Doctorant :	Alexandre RIBAULT
Date du début de la thèse :	28 / 09 / 2015
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE / LR2I
Tuteur de thèse :	Stéphane FLAMANT
Directeur de thèse :	Marc BENDERITTER - IRSN
Ecole doctorale :	Paris 6 / ED394 (Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique)
Financement de thèse :	IRSN

---

**• Introduction :**

Le potentiel thérapeutique des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) a été démontré dans plusieurs études précliniques et chez les victimes d'accident d'irradiation aiguë. De nombreux travaux ont démontré que leur effet thérapeutique est principalement assuré par les facteurs qu'elles sécrètent, dont les microvésicules extracellulaires (MVE). Celles-ci regroupent les exosomes (30-150 nm) et les microparticules (MP ; 150-1000 nm), qui sont impliquées dans la communication intercellulaire.

Les objectifs de cette thèse visent à déterminer *in vitro* les conditions optimales de production des MVE puis à démontrer *in vivo* le potentiel thérapeutique de ces MVE pour le traitement des lésions radio-induites. Enfin, leur évaluation en tant que biomarqueur diagnostique et pronostic de toxicité radio induite sera observée.

**• Méthodes / résultats :**

*In vitro*, différents stimuli à l'origine de la production des MVE par des CSM humaines dérivées de tissu adipeux et de moelle osseuse ont été évalués. L'irradiation des CSM induit une sécrétion préférentielle de MP, tandis que la culture en hypoxie conduit à une production accrue d'exosomes. Ces résultats suggèrent que la quantité et la nature des MVE produites par les CSM peuvent être modulées par les conditions de culture.

*In vivo*, dans un modèle murin de lésion musculo-cutanée par irradiation, nous avons testé le potentiel thérapeutique des exosomes. Le suivi du score lésionnel indique un effet bénéfique des exosomes deux semaines post-injection comparativement aux animaux non injectés.

Enfin, nous avons évalué les MVE d'une cohorte de 217 patients sur-irradiés après radiothérapie (Accident Epinal), ayant développé des rectorragies de grade de sévérité variable. Nous avons démontré une corrélation significative entre le nombre de MP dérivées de plaquettes et de monocytes (MMP) et les doses moyennes reçues, respectivement, à la vessie/rectum et à la prostate antérieure.

**• Conclusion / perspectives :**

Les CSM sécrètent des MPs et des exosomes en fonction du stimulus appliqué. La production d'exosomes par les CSM est favorisée par l'hypoxie. Les résultats *in vivo* montrent un bénéfice thérapeutique des exosomes pour le traitement des lésions radio-induites. Par ailleurs, le contenu protéique, métabolique et miRNomique des MVE sont en cours d'analyse ainsi que les mécanismes d'actions des MVE sur la réparation tissulaire. Nous évaluerons l'effet des exosomes sur le processus angiogénique. Enfin, l'étude clinique permet de proposer les MPs comme marqueur diagnostique et pronostique des complications des radiothérapies et plus particulièrement de la rectite radique.



➤ Mercredi 29 mars

14 h 10

Salle Miajou Labe

## SESSION PARALLÈLE

### Calculs et méthodes mathématiques

Président : Jean-Claude LATCHÉ

Expert-Senior *Mathématiques appliquées*  
Pôle sûreté nucléaire

**Sébastien MARMIN**, Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire.

**Nicolas GARLAND**, Méta-modélisation introspective pour l'analyse des phénomènes physiques simulés. Formalisation dans le cadre du co-krigeage et intégration algorithmique en optimisation et inversion.

**Levent ISBILIROGLU**, Élaboration de stratégies de sélection de signaux accélérométriques pour le calcul du comportement des structures.

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



**Sujet de la thèse :**

**Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire**

<b>Doctorant :</b>	<b>Sébastien MARMIN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>20 / 10 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN / SEMIA / LIMAR</b>
<b>Tuteur :</b>	<b>Jean BACCOU</b>
<b>Directeur :</b>	<b>David GINSBOURGER - Université de Berne LIANDRAT - École Centrale Marseille</b>
<b>Écoles doctorales :</b>	<b>École Centrale de Marseille - Université de Berne</b>
<b>Financement :</b>	<b>IRSN</b>

---

Le contexte de la thèse est la prise en compte des incertitudes dans les activités de R&D pour la mécanique en sûreté nucléaire. En particulier, le travail vise à étudier l'impact des variations des paramètres d'entrée d'un code de calcul sur ses réponses afin de détecter par exemple un éventuel basculement d'un système vers un état très différent de celui de référence. Souvent le nombre de paramètres ainsi que le nombre de valeurs à tester pour chacun d'entre eux rendent impossible une exploration systématique de l'ensemble de variation des données d'entrée et on s'oriente alors vers l'utilisation de statistiques spatiales. Leur intérêt est de permettre l'optimisation de la valeur informative de chacune des simulations en planifiant des expériences numériques qui tiennent compte de régions pertinentes (zones à forts gradients, zone de dépassement de seuil, ...).

Dans ce cas, les développements méthodologiques se font selon deux axes relatifs à la modélisation de la réponse et à l'échantillonnage de nouvelles simulations. Sur le premier point, la relation entre la sortie et les entrées du code de calcul peut être approchée par un modèle simplifié qui est un processus gaussien interpolant. Ce dernier est ensuite utilisé pour optimiser une fonction coût (ou critère d'échantillonnage) qui reflète la pertinence d'une évaluation. La difficulté de ces approches est qu'elles sont souvent basées sur une hypothèse de stationnarité des données, ce qui n'est pas toujours vérifié en pratique. L'objectif de la thèse porte donc sur le développement de nouvelles méthodes de planification d'expériences dans le cas de comportements très hétérogènes.

Nous avons développé et analysé de nouveaux modèles de processus gaussiens non-stationnaires exploitant une déformation de l'espace des paramètres d'entrée estimée par une transformée en ondelettes. Nous avons également défini, étudié, implémenté et comparé plusieurs critères d'échantillonnage pour l'évaluation de fonctions ayant des zones de fortes variations. Ces développements ont été appliqués avec succès sur un cas test simplifié de fissuration mécanique d'un matériau hétérogène à l'aide du code de calcul *Xper*, développé dans le laboratoire commun MIST (IRSN – CNRS).

Les développements futurs concernent l'étude théorique de la convergence de l'algorithme d'estimation de la déformation. Le cadre des ondelettes pourra également être exploité pour créer de nouveaux critères afin de capturer différents types de non-stationnarités. Par ailleurs, nous nous dirigeons maintenant vers le développement d'une méthode de sélection de modèles quand peu d'information sur la fonction est disponible. Enfin, un deuxième cas d'étude en plus grande dimension est actuellement en cours d'élaboration.

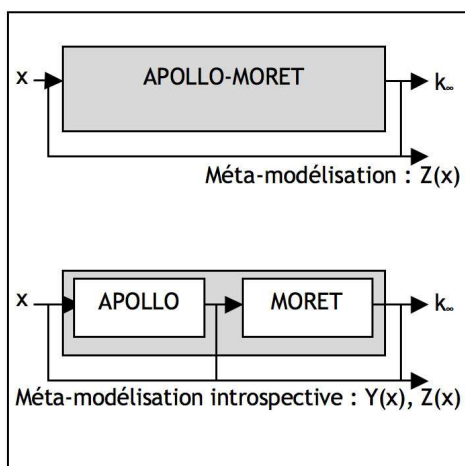
## Sujet de la thèse :

**Méta-modélisation introspective pour l'analyse de phénomènes physiques simulés.  
Formalisation dans le cadre du krigeage et intégration algorithmique  
en optimisation et inversion**

Doctorant :	Nicolas GARLAND
Date du début de la thèse :	30 / 03 / 1987
Laboratoire :	PSN-EXP / SNC
Tuteur de thèse :	Yann RICHEL
Directeur de thèse :	Rodolphe LE RICHEL - EMSE
Ecole doctorale :	Mines Saint-Etienne
Financement de thèse :	IRSN

L'objectif de la thèse est d'améliorer des algorithmes actuellement utilisés en assistance aux expertises de sûreté pour analyser la réponse d'un code de calcul simulant un phénomène physique. On s'intéresse en particulier aux simulations produites par des chaînes de calcul (enchaînement séquentiel de plusieurs codes de calculs distincts).

Le Service de Neutronique et de Criticité utilise par exemple de telles simulations physiques pour déterminer les risques de criticité - emballement de la réaction en chaîne - pour une configuration industrielle donnée (un stockage de combustible par exemple). Les algorithmes alors utilisés permettent de déterminer séquentiellement les simulations à effectuer pour identifier la configuration la plus pénalisante de sûreté (en exploitant une méta-modélisation de la réponse du code de calcul).



Les nouveaux algorithmes exploiteront la spécificité de l'enchaînement des codes de calcul pour améliorer leur pertinence. Par exemple, dans la chaîne de calcul APOLLO-MORET, qui calcule le coefficient de multiplication des neutrons ( $k$ -effectif), APOLLO calcule la réactivité du milieu infini ( $k$ -infini). Cette grandeur contient une information sur la réactivité du système réel, qui n'est pas utilisée dans les algorithmes actuels utilisant des méta-modèles « boîte noire ».

L'exploitation de ces informations intermédiaires de la chaîne de calcul doit permettre de construire des méta-modèles plus précis. En outre, un gain en temps de calcul est possible lorsque la grandeur intermédiaire disqualifie l'intérêt du reste de la chaîne de simulation. Dans l'exemple considéré, MORET est un code long qui prend l'essentiel du temps dans un calcul APOLLO-MORET, et si un calcul d'APOLLO donne un  $k$  infini très faible on pourra se permettre de ne pas effectuer le calcul MORET qui ne peut conduire à un  $k$ -effectif élevé.

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur les différents méta-modèles admissibles. Nous avons fait une comparaison de leurs performances prédictives et nous nous intéresserons ensuite à leur adéquation algorithmique et au problème d'estimation des paramètres du méta-modèle.

Un premier algorithme d'optimisation/pénalisation de sûreté pour prendre en compte les spécificités du cas introspectif a été développé. Des comparaisons non-exhaustives avec l'algorithme actuel tendent à confirmer une économie importante des ressources de calcul grâce à la meilleure prise en compte de la physique intermédiaire de la simulation.

**Sujet de la thèse :****Élaboration de stratégies de sélection de signaux accélérométriques  
pour le calcul du comportement des structures**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Levent ISBILIROGLU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>16 / 12 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-DGE / SCAN / BERSSIN et ISTerre (Université-Grenoble Alpes)</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Maria LANCIERI</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Philippe GUEGUEN - IFSTTAR</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Grenoble / Terre, Univers, Environment</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN et ANR SINAPS (Séisme et Installations Nucléaires)</b>

---

Nonlinear dynamic analysis is a commonly used method to determine seismic behavior of structures with the use of input ground motions (GMs) selected appropriately with seismic hazard. Nonlinear analyses are highly sensitive to the selected input GMs but there has not been a consensus among engineers and seismologists on how to select and scale GMs for nonlinear analysis.

An earthquake scenario defined by magnitude, source-to-site distance, and site-soil properties can have a large variability in spectral accelerations (SAs) due to the uncertainty involved in earthquake-based physics. One of the factors to judge the GM selection and modification methods is to analyze whether they introduce biased estimates of structural responses (e.g. lateral displacements) while reproducing the 'natural' GM variability.

The amount of nonlinear structural analyses is limited with time and budget constraints; therefore, the input variability is reduced drastically in the current practice to satisfy the strict requirements of building codes. French nuclear safety guide, ASN Guide 2-01, allows the use of one GM set consists of, at least, 5 signals, and in the current practice, GMs in a set are "scaled" or "spectrum-matched" to have average SAs very close to the hazard spectrum (often within  $\pm 10\%$  of boundary).

The study herein examines the families of real, linearly scaled and "spectrum-matched" GMs as well as their effects on mean and its variability for lateral displacement estimates of simple structural models.

The study evaluating current practice based on spectrum-matched waveforms very close to target spectrum and with reduced input GM variability shows that lateral displacement estimates differ greatly from one set to another. It implies that reducing GM variability does not reduce variability among lateral displacement estimates.

The upper and lower boundaries are extended from  $\pm 10\%$  to  $\pm 30\%$  for all families of GMs and a large number of GM sets is retrieved to use as a benchmark. Spectrum-matched waveforms and linearly scaled GMs reveal unbiased estimates of mean lateral displacements with respect to the sets consist of unscaled real GMs. However, they do not produce same margin of spread for lateral displacement estimates. Based on the analyses on simple structural models under families of abovementioned GMs, we conclude that a large amount of GM sets is needed to determine mean lateral displacements. For variability studies, a large amount of GM sets consist of unscaled real records is needed.

During the last year, the on-going studies on complex structures and GM prediction equations will be finalized and limitations of current benchmark will be discussed.

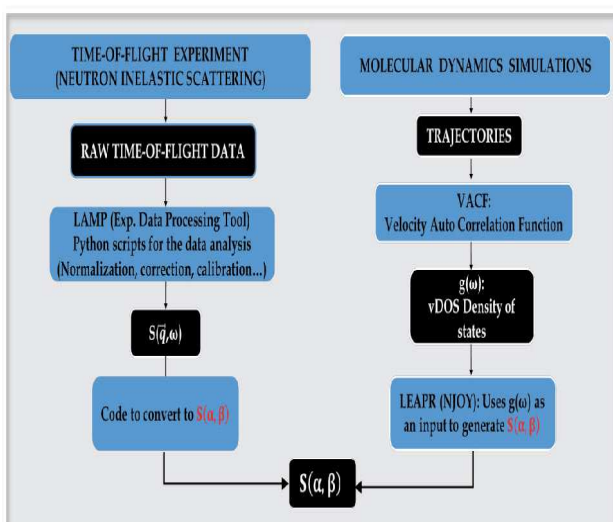
## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Vaibhav JAISWAL
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-EXP / SNC / LNR
Tuteur de thèse :	Luiz LEAL
Directeur de thèse :	Valérie VALLET - Laboratoire PHLAM, Université de Lille, Sciences et Technologies
Ecole doctorale :	école doctorale sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement (ed104), Lille
Financement de thèse :	IRSN

Light water is the most widely used moderator in nuclear power reactors, namely, pressurized water reactors (PWRs). Reliable thermal neutron scattering cross-section data of light water is thus necessary for criticality safety studies and reactor physics applications. Neutron scattering cross-section data of light water are available in standard nuclear cross-section data libraries, represented by  $S(\alpha, \beta)$  scattering law where  $\alpha$  and  $\beta$  stand for the unit-less momentum and energy transfers respectively. Experimental data for  $S(\alpha, \beta)$  of light water matching reactor normal operating conditions (Pressure  $\sim 150$  bar and Temperature  $\sim 600$  K) is very scarce. Presently, the standard data libraries rely on experimental data measured in the 60s.

Inelastic double differential scattering cross-section (DDXS) measurements were performed on light water using high resolution TOF spectrometers namely the IN4c and the IN6 at the Institut Laue-Langevin, Grenoble. Experiments were carried out at several temperatures and pressures, corresponding to the normal operating conditions of nuclear power reactors and the dynamic structure factor  $S(q, \omega)$  was obtained after a detailed data reduction of the experimental data.  $S(q, \omega)$  was then transformed to  $S(\alpha, \beta)$  thermal scattering law and the impact of temperature and pressure on the double differential thermal neutron scattering cross-section was studied. Molecular dynamics (MD) simulations of light water were also carried out using GROMACS code, to investigate the same for high energy transfers, as experiments can cover only a limited range due to kinematic restrictions and limited angular range of detectors. As a consequence of the experimental studies, we are able to draw a conclusion that the DDXS of light water depends only on temperature and is independent of pressure. Comparison of the theoretical (MD) and experimental approach will provide better interpretation of the impact of temperature on the  $S(q, \omega)$ . The entire methodology is explained in the flowchart below (Figure).



In addition, estimation of uncertainties in the  $S(\alpha, \beta)$  is part of the PhD development, especially study of the systematic and the statistical uncertainty. Error propagation in the generation of  $S(q, \omega)$  from the data measurement is a very important area that has to be reviewed in order to estimate the uncertainty in the  $S(\alpha, \beta)$  and thus the DDXS.

*Approach towards  
generation of  $S(\alpha, \beta)$   
of light water.*



➤ Mercredi 29 mars

16 h 20

Salle Miajou Labe

## SESSION PARALLÈLE

### **Thermohydraulique**

**Président : Michel GIOT**

Professeur à l'Université catholique de Louvain

Membre du Comité de visite de l'IRSN

**Ali SWAIDAN**, Écoulement diphasique dans un milieu à porosité évolutive.

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

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

**Adrien ABBATE**, Simulation expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide.

## Sujet de la thèse :

## Écoulement diphasique dans un milieu à porosité évolutive

Doctorant :	Ali SWAIDAN
Date du début de la thèse :	13 / 10 / 2014
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Tuteur de thèse :	Florian FICHOT
Directeur de thèse :	Michel QUINTARD - Institut de mécanique des fluides de Toulouse
Ecole doctorale :	INP Toulouse SDU2E
Financement de thèse :	IRSN / EDF

Severe accidents leading to the fusion of the nuclear reactor core must be anticipated to enhance the efficiency of their mitigation. Such accidents have occurred at TMI-2 in the USA-1979 and in Fukushima, Japan-2011 where 3 reactors were destroyed.

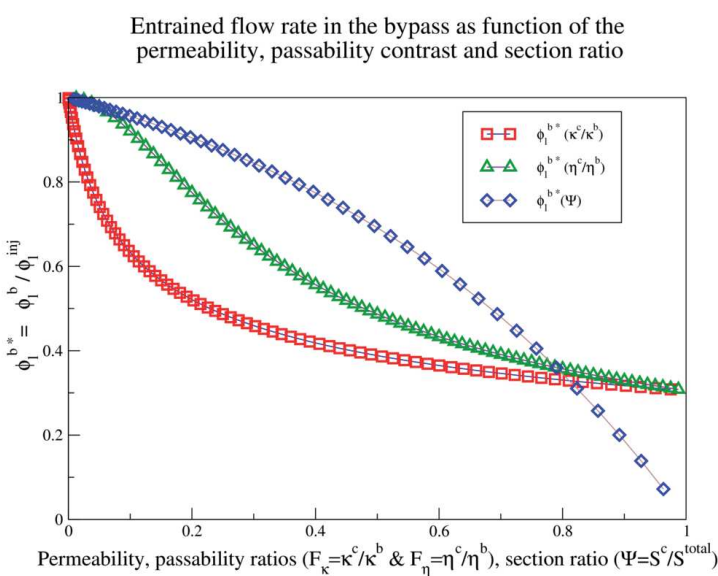
Following a loss of coolant accident, the reactor core gets uncovered and starts to heat-up because of the residual heat. As the accident evolves, oxidation of the fuel cladding by the coolant vapor and melting of fuel lead to core degradation. In this case, injection of water into the core (reflooding) to remove the residual heat is vital for stopping the progressive degradation and preventing the core from melting down.

Reflooding can cause a thermal shock and the embrittlement of the cladding leading to the formation of a porous debris bed in the core. The evolution of the accident upon reflooding this hot bed can lead to the presence of zones of reduced porosity and permeability limiting the coolant penetration upon accumulation of molten material; and/or the presence of impermeable compact zones which could block the coolant flow.

The PEARL experiments, conducted by IRSN, are modeled and simulated using ICARE/CATHARE code (developed by IRSN for core degradation studies) to assess the evolution of a bottom reflooding of a hot debris bed surrounded by a bypass of larger permeability simulating the presence of intact zones in the core around the compact debris bed.

An analytical model is then developed to investigate thoroughly the reflooding of a superheated porous medium composed of two layers of contrasting permeability and porosity. This model computes the quench front velocity, water-to-steam conversion ratio, and the flow rate of water

entrained in the bypass. It provides good qualitative and quantitative results for the two-phase flow redistribution as compared to experimental data. It also has several advantages as it allows: performing fast evaluations of the efficiency of cooling, up-scaling to reactor-scale straightforwardly, and performing sensitivity studies (examples are presented in the graphs below 'c'=central debris bed, 'b'=bypass) on the physical properties of the particle beds and the fluid as well as the variations of various terms in the momentum equations.



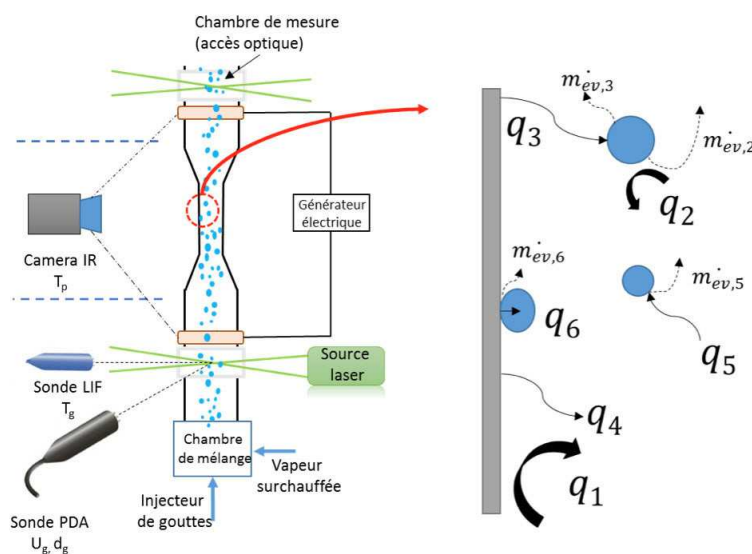
## Sujet de la thèse :

## Étude expérimentale du transfert pariouide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire

**Doctorant :** Juan David PENA CARRILLO  
**Date du début de la thèse :** 05/10/2015  
**Laboratoire :** PSN/SEMIA/LIMAR  
**Tuteur de thèse :** Tony GLANTZ  
**Directeur de thèse :** Michel GRADECK, Alexandre LABERGUE (LMTA Université de Lorraine)  
**Ecole doctorale :** Université de Lorraine / Energie, Mécanique, Matériaux  
**Financement de thèse :** IRSN & ANR RSNR Perfroï

L'un des accidents de dimensionnement d'un réacteur à eau pressurisée est l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP); cet accident fait l'objet d'un programme de recherche au sein de l'IRSN, le projet ANR-PERFROI (Étude de la perte de refroidissement). L'évènement initiateur d'un tel accident est une brèche sur le circuit primaire du réacteur entraînant une perte d'inventaire en eau, et de ce fait à un assèchement des assemblages combustibles. En conséquence, une augmentation considérable de la température surviendrait à l'intérieur du cœur du réacteur. Ainsi, les gaines de combustible peuvent éventuellement se déformer et des zones dites ballonnées apparaissent. Ces zones vont avoir un fort impact sur l'efficacité du refroidissement du cœur par les systèmes de secours.

Pour contribuer à l'étude thermo-hydraulique d'un APRP, la présente thèse a pour but la caractérisation expérimentale des interactions entre un écoulement diphasique de vapeur/gouttes traversant une zone partiellement ballonnée. Afin de reproduire la géométrie de ces zones, une configuration type Venturi a été retenue pour la veine d'essai. Plusieurs configurations géométriques de la zone ballonnée, caractéristiques d'un APRP, seront analysées (longueur et taux de bouchage associés au ballonnement). Afin de caractériser les échanges thermiques pariouide ainsi que la dynamique des gouttes, des diagnostics optiques et thermiques sont utilisés : l'Anémométrie Phase Doppler (PDA) pour mesurer le diamètre et la vitesse des gouttes, la Fluorescence Induite par Laser (LIF) pour mesurer la température des gouttes et la Thermographie Infrarouge (IR) afin d'estimer le flux de chaleur extrait du tube (Figure 1).



En parallèle, une modélisation du problème sera développée afin d'obtenir une approche théorique de la capacité de refroidissement de l'écoulement diphasique. Le système d'équations décrivant la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie permettra d'estimer l'impact respectif des différents mécanismes de transferts thermiques mis en jeu ainsi que l'évolution spatio-temporelle des paramètres thermo-hydrauliques.

Figure 1. (Gauche) Configuration de la veine d'essai type Venturi et instrumentation ; (Droite) Contributions thermiques à l'intérieur du tube ( $q_1$  et  $q_2$ , convection forcée thermique ;  $q_3$ ,  $q_4$  et  $q_5$  rayonnement thermique ;  $q_6$  impacts parioulette ;  $m_{ev}$  changement de phase).



## Sujet de la thèse :

## Ébullition transitoire : modélisation du transfert de chaleur

Doctorant :	Valentin SCHEIFF
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN / SEMIA / LIMAR
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Catherine COLIN, Julien SEBILLEAU, Institut de mécanique des fluides de Toulouse
Ecole doctorale :	Université de Toulouse - MEGEP
Financement de thèse :	Cofinancement EDF - IRSN

Lors d'un hypothétique accident de type RIA (Reactivity Initiated Accident) dans un réacteur nucléaire, le pic de puissance au niveau d'un crayon de combustible peut déclencher une ébullition transitoire conduisant à une forte augmentation de la température de la gaine. L'évolution est tellement rapide qu'aucun régime de transfert de chaleur n'a le temps de s'établir.

Quelques études en conditions réacteurs ont permis d'obtenir des courbes d'ébullition transitoires mais la modélisation qui en découle manque encore de fiabilité. Les essais prévus dans le programme international d'essais dans le réacteur de recherche CABRI simuleront le phénomène mais ne permettront pas de développer sa modélisation. Ce constat a motivé l'IRSN à entreprendre un programme de recherche. Une expérience modèle a ainsi été construite à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Cette expérience considère l'écoulement d'un réfrigérant dans un canal de section semi-annulaire, simulant l'écoulement autour d'un crayon de combustible, dont la partie intérieure, composée d'une feuille de métal, est chauffée rapidement par effet Joule, simulant l'échauffement de la gaine du crayon. Une caméra rapide permet de visualiser les régimes d'ébullition.

La thermographie infra-rouge permet de mesurer la température de la paroi externe du métal. L'application d'une peinture noire sur le métal augmente son émissivité mais aussi la résistance thermique de la paroi. Une étude a permis d'optimiser l'estimation de la température interne du clinquant, qui est la grandeur d'intérêt, en fonction de la peinture et de corriger la mesure.

L'expérience doit permettre d'étudier le transfert de chaleur lorsqu'un film de vapeur se forme et isole la paroi ce qui tend à augmenter fortement la température de paroi. Du fait de la faible inertie thermique de la paroi, le pilotage initial de l'expérience par un signal de puissance rendait difficile cette étude. Un contrôle en température à l'aide d'un P.I.D. (Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur) a donc été implémenté. Les résultats en ébullition nucléée permettent de retrouver les résultats de la littérature tant en conditions stationnaires que transitoires (rampes de température de 5-500 K/s).

On envisage désormais d'étudier l'ébullition en film, pendant la chauffe ou le refroidissement de la paroi.

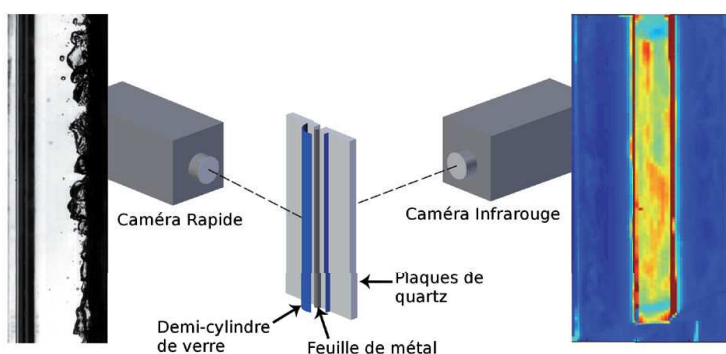


Schéma de l'instrumentation de l'expérience et exemples de visualisations par les caméras.

## Sujet de la thèse :

## Simulation expérimentale de l'interaction thermique au sein d'un fluide

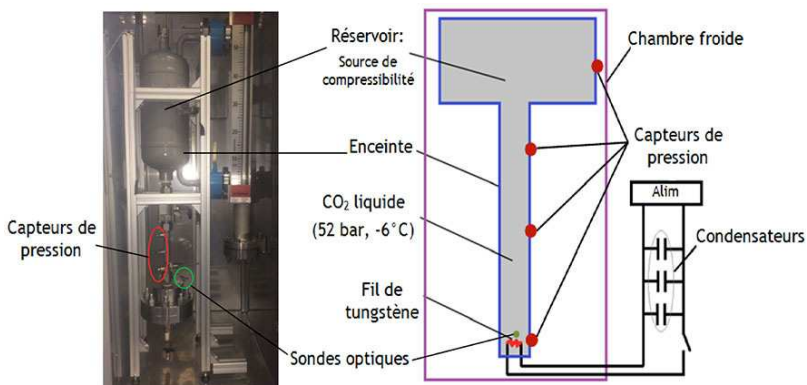
Doctorant :	Adrien ABBATE
Date du début de la thèse :	06 / 10 / 2014
Laboratoire :	PSN / SEMIA / LIMAR
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Directeur de thèse :	Philippe HABERSCHILL et Romuald RULLIERE CETHIL, Lyon
Ecole doctorale :	Université de Lyon / MEGA
Financement de thèse :	co-financement EDF-IRSN

Un accident d'insertion de réactivité (RIA) dans un cœur nucléaire pourrait provoquer la rupture d'une gaine et l'éjection d'une fine poudre de combustible chaud dans le caloporteur. La réponse du fluide peut être violente. L'étude de cette interaction (Fuel/Coolant Interaction FCI) est importante pour la sûreté nucléaire. Plusieurs études et expériences ont été menées avec de l'eau ou du sodium ou sont prévues dans le cadre des essais intégraux du programme international dans le réacteur CABRI. Cependant, les conditions complexes ne permettent pas la mesure de certaines grandeurs locales nécessaires à l'étude de la dynamique de vaporisation.

En effet, effectuer des expériences de vaporisation violente avec de l'eau requiert beaucoup d'énergie et des équipements résistant aux hautes pressions, notamment pour reproduire les conditions de fonctionnement d'une centrale nucléaire de type REP. Il est ainsi intéressant d'utiliser un autre fluide, tel que le dioxyde de carbone, dont les propriétés thermodynamiques (pression critique, enthalpie de vaporisation...) réduisent ces contraintes. Néanmoins, afin de pouvoir comparer et utiliser les observations de l'expérience, il est indispensable d'établir et de vérifier des lois de similitudes entre les deux fluides. L'étude de ces similarités entre l'eau et le dioxyde de carbone a établi qu'en conservant la pression réduite ainsi que le titre thermodynamique, on obtient des rendements similaires pour la conversion de l'énergie thermique en travail avec des énergies mises en jeu divisées par cinq. Ceci a permis d'envisager la conception et la réalisation d'un banc d'essais pour provoquer l'interaction thermique violente au sein d'un fluide.

Afin de reproduire la cinétique de l'interaction, il a été nécessaire d'adapter la géométrie du système. L'impulsion d'énergie au sein du fluide est générée à l'aide d'un filament de tungstène subissant la décharge d'une batterie de condensateurs. Le schéma ci-dessous illustre la réalisation du système expérimental.

Ce banc expérimental, en voie d'achèvement, permettra d'acquérir des observations locales de la réaction fluide/caloporteur telles que la pression maximale et la quantité



de vapeur formée. Nous comptons présenter les premiers résultats de ce banc d'essais. La base de données expérimentale qui sera établie dans les prochains mois sera utilisée pour valider les modèles intégrés dans le logiciel de calcul thermohydraulique CIGALON développé par l'IRSN.



## ➤ Mercredi 29 mars

16 h 20

Salle Bord de mer

### SESSION PARALLÈLE

#### **Épidémiologie**

**Présidente : Céline DINOCOURT**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Lucie FOURNIER**, Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire.

**Sabine HOFFMANN**, Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chroniques et à faibles doses de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application à une cohorte de mineurs d'uranium.

**Ségoène BOUET-RIVOAL**, Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses au sein d'une cohorte de travailleurs surveillés pour contamination interne.

**Sujet de la thèse :**

**Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire**

<b>Doctorant :</b>	Lucie FOURNIER
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2014
<b>Laboratoire :</b>	PRP-HOM / SRBE / LEPID
<b>Tuteur de thèse :</b>	Klervi LEURAUD
<b>Directeur de thèse :</b>	Dominique LAURIER - IRSN
<b>Ecole doctorale :</b>	Paris Saclay – Ecole doctorale de santé publique
<b>Financement de thèse :</b>	Bourse école doctorale

---

Les études épidémiologiques sur les travailleurs du nucléaire permettent de quantifier les effets sanitaires à long terme d'expositions chroniques à de faibles doses de rayonnements ionisants (RI). En France, la cohorte nationale CEA-AREVA-EDF regroupe plus de 59 000 salariés de ces entreprises surveillés pour une exposition externe aux RI par le port de dosimètres. L'objectif de cette thèse est de considérer différentes sources de biais dans l'analyse du risque de cancer associé à l'exposition externe aux RI dans cette cohorte et d'en évaluer l'impact sur l'estimation de la relation dose-réponse.

Le premier axe a porté sur la possible exposition des travailleurs à l'incorporation de radionucléides. En l'absence de données individuelles sur les cas de contaminations internes, un indicateur basé sur les unités de travail a été défini pour attribuer un niveau de risque de contamination interne à chaque travailleur. La prise en compte de cet indicateur dans les analyses a peu modifié l'estimation du risque de cancer. Ces résultats suggèrent que l'omission d'informations sur la contamination interne ne générerait pas de biais substantiel dans l'estimation du risque de cancer en relation avec l'exposition externe aux RI.

Le second axe a porté sur les expositions aux RI d'origine non professionnelle. En effet, les travailleurs sont également exposés à des radiations environnementales et médicales dues notamment aux examens radiologiques dans le cadre de la médecine du travail. Nous avons tout d'abord établi des scénarios de doses dues à ces expositions non-professionnelles, puis étudié l'impact de la prise en compte de ces expositions sur le risque de mortalité par cancer. Les résultats montrent que la relation dose-réponse entre mortalité par cancer et exposition professionnelle n'est pas modifiée par l'ajustement sur l'exposition environnementale, alors que la prise en compte de l'exposition médicale atténue l'amplitude de la relation.

Le troisième axe porte sur la problématique des seuils d'enregistrement des dosimètres, seuils en dessous desquels, les doses délivrées ne peuvent être quantifiées. Historiquement, ces doses sous le seuil de détection étaient considérées comme nulles dans les analyses, entraînant une probable sous-estimation de la dose effectivement reçue. Un descriptif historique complet retraçant les pratiques dosimétriques dans la cohorte de 1950 à 2004 a été réalisé, à partir duquel des scénarios de valeurs à imputer aux doses considérées comme nulles par défaut seront établis. L'impact de la non prise en compte des doses sous le seuil de détection des dosimètres sera évalué à partir de ces scénarios.

**Sujet de la thèse :**

**Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chroniques et à faibles doses de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application à une cohorte de mineurs d'uranium**

<b>Doctorant :</b>	Sabine HOFFMANN
<b>Date du début de la thèse :</b>	17 / 11 / 2014
<b>Laboratoire :</b>	PRP-HOM / SRBE / LEPID
<b>Tuteur de thèse :</b>	Sophie ANCELET
<b>Directeur de thèse :</b>	Chantal GUIHENNEUC (Université Paris Descartes)
<b>Ecole doctorale :</b>	Paris Saclay / Ecole Doctorale de Santé Publique
<b>Financement de thèse :</b>	cofinancement IRSN-AREVA

---

En épidémiologie des rayonnements ionisants, les erreurs de mesure d'exposition et l'incertitude sur la dose à l'organe constituent l'une des sources d'incertitude les plus importantes. Lorsque les erreurs de mesure ne sont pas ou mal prises en compte, ces incertitudes d'exposition peuvent mener à des estimateurs de risque biaisés ainsi qu'à une déformation de la relation dose-réponse.

L'objectif de cette thèse est d'affiner, au moyen de techniques statistiques appropriées, l'estimation actuelle du risque de décès par cancer du poumon radio-induit au sein de la cohorte française des mineurs d'uranium, par la prise en compte explicite des erreurs de mesure d'exposition au radon et ses descendants à vie courte (RDP).

Une approche hiérarchique bayésienne permettant de combiner de multiples sources d'incertitude, dont un mélange d'erreurs de mesure non-partagées de type Berkson et classique et des facteurs modifiants potentiels, a été mise en œuvre afin d'estimer l'association entre l'exposition au RDP et la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium français. Bien qu'une première étude par simulation ait confirmée que l'approche proposée permettrait une diminution substantielle du biais induit par l'existence d'erreurs de mesure non-partagées, aucune modification substantielle du risque estimé n'a été mise en évidence à partir des données de la cohorte.

Une explication possible est que la structure d'erreur supposée est potentiellement trop simple pour décrire les erreurs dans la cohorte.

Aussi, une deuxième étude par simulation a été réalisée afin d'analyser l'impact d'erreurs de mesure plus complexes sur l'estimation de risque. Cette étude montre qu'une erreur de mesure d'exposition partagée sur plusieurs années de suivi d'un même travailleur conduit à des risques plus fortement biaisés ainsi qu'à une déformation plus sévère de la relation exposition-risque qu'une incertitude non-partagée ou partagée par plusieurs travailleurs.

La principale perspective de ce travail de thèse est de complexifier le modèle hiérarchique bayésien jusqu'alors proposé afin de prendre en compte l'existence d'erreurs de mesure d'exposition partagées dans la cohorte ainsi que diverses sources d'incertitude intervenant dans le calcul de la dose absorbée au poumon. Dans ce contexte, une élicitation de lois a priori reflétant l'incertitude relative aux paramètres d'entrée importants du modèle dosimétrique (débit respiratoire, présence de diesel dans les mines...) a été conduite auprès de 3 experts des conditions d'exposition dans les mines d'uranium françaises.

Enfin, si le temps le permet, la performance de l'approche hiérarchique bayésienne sera comparée aux méthodes de correction fonctionnelles fréquentistes classiques.

**Sujet de la thèse :****Analyses des risques de pathologies cancéreuses et de l'appareil circulatoire  
au sein de cohorte de travailleurs de l'uranium**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Ségolène BOUET-RIVOAL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SRBE / LEPID</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Olivier LAURENT</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Dominique LAURIER- IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Sud / Ecole doctorale de santé publique</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

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

L'objectif de cette thèse est de contribuer à améliorer la connaissance des effets des expositions à de faibles doses de rayonnements ionisants, en particulier du fait de contaminations internes. La thèse consistera en l'analyse des risques de pathologies cancéreuses et de l'appareil circulatoire au sein de cohortes de travailleurs du cycle du combustible nucléaire.

Le premier axe de la thèse a consisté en l'analyse de la mortalité dans une nouvelle cohorte de 1300 travailleurs des usines de traitement du minerai d'uranium (cohorte F-MILLERS) en comparaison avec la population nationale et locale française. Un « effet du travailleur sain » a seulement été observé en comparaison à la population nationale. Plusieurs excès de mortalité ont été observés chez les travailleurs des unités de fabrication : décès pour toutes causes et par accidents, maladies ischémiques, maladies non-cancéreuses du système digestif, cancer du foie et des voies hépatobiliaires, cancer du larynx et cancers possiblement associés au tabac. Dans cette étude les facteurs de risques responsables de ces excès ne peuvent pas être identifiés. Il est donc nécessaire de conduire des études analytiques complémentaires.

Les deux derniers axes porteront sur l'analyse de l'association entre la dose (interne et externe) et la mortalité dans une cohorte de 4 000 travailleurs de l'uranium :

- 2<sup>ème</sup> axe : analyse statistique classique (fréquentiste) incluant une exploration détaillée de l'impact des potentiels facteurs confondants (notamment catégorie socio-professionnelle, pression artérielle, obésité, tabagisme, diabète).
- 3<sup>ème</sup> axe : développement d'une approche bayésienne hiérarchique pour tenir compte des incertitudes dans l'estimation de la dose interne résultant de mesures de surveillance en dessous de seuils de détection ou d'interprétation, et donc dans l'estimation du risque.

➤➤➤ Mercredi 29 mars  
Salle Bord de mer

Après un premier événement en 2015, l'IRSN organise la deuxième édition du concours « **3 minutes pour une thèse** ».

Inspiré du concours international **Ma thèse en 180 secondes\*** destiné au public profane, il est ici adapté à l'assistance des Journées des thèses, avec une orientation légèrement plus scientifique.



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

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

Le concours se déroulera après le dîner et sera animé par **Gauzelin Barbier**.

**Les participants seront :**

**Youssef ALILOU**, Impact sur le colmatage en régimes permanent et transitoire des écoulements d'air induits par le plissage de médias filtrants THE.

**Éric DELAUME**, Méthode de raffinement local adaptatif multi-niveaux pour la fissuration de matériaux hétérogènes.

.. **Loïc DUCROS**, Variabilité des teneurs en TOL (Tritium Organiquement Lié) et Carbone 14 au sein des hydro systèmes continentaux côtiers méditerranéens - Rôle de la qualité de la matière organique.

**Jackie TAV**, Étude du dépôt de radionucléides par les gouttelettes de brouillards et de nuages sur les végétaux à partir d'expérimentation en conditions *in situ*.

**Laura FERRY**, Évaluation des rejets en situation accidentelle dans l'installation ITER : béryllium et tritium.

**Sabine HOFFMANN**, Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chroniques et à faibles doses de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application à une cohorte de mineurs d'uranium.

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

**Michaël MANGEON**, Élaboration et mise en œuvre des référentiels techniques pour la régulation des risques nucléaires : le cas des prescriptions en matière d'inondation.

**Geoffrey PELLERIN**, Quantification des vitesses de dépôt sec et identification des processus d'émission des aérosols sur des couverts naturels.

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

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





➤ Jeudi 30 mars

08 h 40

Salle Bord de mer

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Pronostic et analyse**

**Président : Thierry BOURGOIS**

Responsable mission stratégie et partenariats

Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

**Mickaël MANGEON**, Élaboration et mise en œuvre des référentiels techniques pour la régulation des risques nucléaires : le cas des prescriptions en matière d'inondation.

**Ismail GOUNRI**, Analyse socio-historique de choix controversés en matière de dispositions de sûreté sur les INB françaises.

**Oussama RABOUN**, Analyse mathématique du risque spatialisé en présence de multiples enjeux.

**Thi Phuong Anh MAC**, Développement d'outils d'aide au diagnostic et au pronostic en contexte d'accident nucléaire grave.

**Sujet de la thèse :**

**Le régime de régulation des risques à la lumière de ses instruments : le cas des règles et guides en matière d'inondation appliqués à la sûreté nucléaire**

<b>Doctorant :</b>	<b>Michaël MANGEON</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 11 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SFOHREX / LSHS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Olivier CHANTON</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Frédérique PALLEZ – Mines ParisTech (CGS)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Economie Organisations Société (EOS), Paris</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR RSNR Agoras</b>

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un programme ANR intitulé AGORAS (Amélioration de la gouvernance des organisations et des réseaux d'acteurs pour la sûreté nucléaire) qui vise à comprendre la gouvernance des risques nucléaires en France à travers le prisme des sciences humaines et sociales. Cette thèse en sciences de gestion a pour objet d'analyser un régime de régulation des risques, sur le temps long (1960-2016), au regard de ses instruments (règles, guides, ...).

Partant du postulat que l'étude de ces processus d'instrumentation permet de tracer les changements du régime de régulation des risques, notre cas d'étude porte sur les instruments de régulation du risque inondation, cas symbolique par son historique événementiel (Blayais, Fukushima). Nous nous intéressons à trois processus de l'instrumentation :

- Les conditions d'émergence des instruments,
- La conception des instruments,
- L'appropriation et la mise en œuvre des instruments.

Pour mener à bien ce travail, notre méthodologie d'enquête nous a conduit à analyser un nombre très important de documents d'archives, produits entre 1960 et 2016, complétés par des entretiens avec des acteurs ayant participé à la conception des instruments. Deux cas (CNPE du Blayais et site nucléaire du Tricastin) ont notamment fait l'objet d'une étude plus approfondie (observations et entretiens) pour analyser la mise en œuvre des instruments.

Par un travail de remise en contexte socio-historique et une analyse fine des jeux d'acteurs (autour des savoirs, des méthodes et des pratiques), nous avons pu mettre en évidence le fonctionnement spécifique du régime de régulation dans les années 1970-1980 et les évolutions récentes.

La rencontre entre deux domaines de gouvernance (gouvernance de l'eau et sûreté nucléaire) a notamment fait l'objet d'un travail spécifique autour de la gestion du risque inondation sur le site du Tricastin dans les années 2000. Les premiers résultats issus de ces travaux ont déjà fait l'objet de plusieurs communications durant l'année 2016 et seront valorisés par des publications en 2017.

Nous estimons que ce travail peut permettre d'améliorer la réflexivité de l'IRSN sur ses pratiques et contribuer à enrichir un modèle de conception de futurs instruments.



*Un expert du Département de Sûreté Nucléaire (DSN) du CEA en 1975. Le DSN deviendra l'IPSN en 1976, puis l'IRSN en 2001.*

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

---

Doctorant :	Ismail GOURMI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-SRDS / SFOHREX / LSHS
Tuteur de thèse :	Olivier CHANTON
Directeur de thèse :	Soraya BOUDIA – Université Paris Descartes
Ecole doctorale :	Université Sorbonne Paris Cité
Financement de thèse :	IRSN

---

Les accidents graves de *Three Mile Island* (1979) et de Fukushima (2011) nous rappellent que l'hypothèse d'un accident grave est plausible et qu'il faut s'y préparer. Cette thèse vise à retracer la trajectoire d'un objet particulier, le *corium*, dans les processus scientifiques de connaissances et d'expertise, de la formalisation du problème scientifique aux solutions techniques proposées. Très chaud et hautement radioactif, le *corium* issu de la fusion du cœur en situation accidentelle présente à court terme un risque d'explosion lorsqu'il interagit avec l'eau ou le béton, et à plus long terme, de contamination de l'environnement.

L'objectif de cette thèse en sciences sociales est de retracer, en adoptant une approche socio-historique, la trajectoire des choix techniques paraissant aujourd'hui sous-optimaux. Il s'agit en particulier d'appréhender les effets de contexte l'ayant influencée, en identifiant tout particulièrement l'état des connaissances et les problématiques socio-techniques des différentes époques. La première année de thèse a permis de montrer comment la problématique du corium a émergée pour la sûreté nucléaire particulièrement dans les années 1960 et 1970. J'ai ainsi mis en évidence des effets de contexte déterminants qui ont conduit à la non prise en compte du risque corium à la conception des réacteurs aux Etats-Unis puis en France lors des débuts du développement de l'énergie nucléaire mais également le rôle déterminant de l'accident de *Three Mile Island* (1979) pour la mise à l'agenda technique du risque de fusion du cœur.

La thèse cherche par ailleurs à comprendre comment l'incertitude issue à la fois du comportement difficilement prévisible du corium et de l'usage d'instruments complexes comme les codes de calculs est traitée dans les processus d'expertise. Pour cela je m'intéresse tout particulièrement au programme international actuel de recherche sur la rétention en cuve du corium piloté par l'IRSN (IVMR) où se tiennent de nombreux débats quant à la faisabilité d'une rétention en cuve ou aux marges de sûreté acceptables. J'étudie également la controverse qui a accompagné l'épaississement du radier de la centrale de Fessenheim, en particulier pour comprendre comment est géré un parc existant grâce à des solutions innovantes développées dans le cadre du dialogue technique. Ce dernier point est particulièrement important dans un contexte de prolongement de la durée de vie des centrales et d'augmentation des exigences de sûreté applicables aux réacteurs existants.

**Sujet de la thèse :****Analyse mathématique du risque spatialisé en présence de multiples enjeux**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Oussama RABOUN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA / LIMAR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Eric CHOJNACKI</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Alexis TSOUKIAS - LAMSADE</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris-Dauphine / PSL</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR-RSNR AMORAD</b>

---

Le risque est défini classiquement comme le produit de l'aléa et de la vulnérabilité. Dans le cadre de cette thèse, l'aléa rassemble l'ensemble des données caractérisant le scénario accidentel étudié et la vulnérabilité l'ensemble des enjeux (environnementaux, économiques...) considérés. L'hypothèse prise dans cette thèse est que pour prendre une décision il est important de disposer au-delà de cartes établissant les concentrations de rejet, de cartes établissant leur impact en termes d'enjeux. Dans cette perspective, nous avons discrétisé la carte de la rade de Toulon en quarante-cinq unités géographiques (g.u), retenu cinq enjeux et élaboré une procédure de construction des fonctions d'impact sur chaque enjeu vu comme un critère en tenant compte de la connaissance sur la relation liant concentration et impact. Ensuite, nous avons développé trois procédures d'agrégation synthétisant le risque spatialisé multicritère. Comme cas d'application, on considère quatre points de rejet et trois types de courant caractérisant douze scénarios accidentels dans la rade de Toulon.

La première procédure agrège l'information spatiale et les différents scénarios afin de synthétiser l'information en des indicateurs d'impact moyen par enjeu. Pour ceci on a construit deux modèles, le premier est basé sur une méthode de surclassement tandis que le deuxième sur une méthode d'utilité espérée. Dans cette approche, nous supposons qu'il n'y a pas d'interaction entre les g.u.

La seconde procédure d'agrégation fournit des cartes de référence représentant chaque classe d'équivalence de scénarios. La démarche consiste à construire une carte agrégée pour chaque scénario. Ensuite, on évalue les cartes, en considérant la possibilité d'interactions entre les g.u contiguës. La dernière étape consiste à comparer les cartes en utilisant des classes d'équivalence définies par des cartes de référence.

La dernière procédure évalue la situation générale dans la rade de Toulon.

La procédure consiste à :

1. Modéliser l'occurrence de chaque scénario par une loterie et évaluer sa fonction d'utilité en agrégeant la matrice de performance (matrice d'évaluation des g.u pour plusieurs critères ou enjeux),
2. Calculer l'utilité espérée afin de synthétiser l'information spatiale et éliminer les incertitudes.

Pour assurer l'existence d'une telle fonction d'utilité on peut se baser sur l'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern, ou bien sur celle de Jensen. Dans le cas de l'axiomatique de Jensen, nous avons une unique fonction d'utilité linéaire assurée par le théorème de Fishburn. On peut aussi considérer des modèles intermédiaires en distinguant pour un enjeu (ou critère) donné le cas où les poids des g.u seraient identiques ou non.

**Sujet de la thèse :****Développement d'outils d'aide au diagnostic  
et au pronostic en contexte d'accident nucléaire grave**

<b>Doctorant :</b>	<b>Thi Phuong Anh MAC</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>04 / 01 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SAG / LETR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Karine CHEVALIER-JABET, Eric CHOJNACKI</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christophe GONZALES - UPMC</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPMC / EDITE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Financement européen H2020, Fastnet</b>

---

Tools for the diagnosis and prognosis of severe accidents are essential for nuclear emergency management. FASTNET—a European project initiated by IRSN based on feedbacks on the Fukushima accident—aims to develop a set of tools and methods common to both tasks, while highlighting the complementarity between existing deterministic techniques and more exploratory probabilistic approaches.

This research topic focuses on a probabilistic method to determine, from a list of observables, scenarios that may correspond to an accidental situation in progress with associated degrees of reliability. It is based on Bayesian networks—a model of knowledge representation and reasoning stemming from graph theory and probability theory. Such a network is composed of a directed acyclic graph and the underlying probability distributions: in the case of a nuclear accident, the nodes of the corresponding network represent the physical variables involved and its edges—the links between them.

The chosen strategy is not to produce an *a priori* network that could represent an accident but to learn a network structure from a set of examples on observables. A structure learning algorithm has been adapted from the literature's PC algorithm to allow learning under the presence of deterministic relations between variables—which would break the assumption of faithfulness between graphical and probabilistic independencies—and tested on very simple cases. In order to scale it up, a learning base is under construction with 'real' accidents data generated with IRSN's accident source term evaluation code ASTEC. Since Bayesian networks were originally designed for discrete variables only, discretisation of continuous variables is another challenge of the learning process. It has been tackled with an expectation-maximisation approach based on a truncated Gaussian mixture model, which still implies some information loss and edges orientation problems. An alternative with added continuous nodes—each conditioned by the corresponding discretised variable and its parents—in the network is being considered.

The next step will consist in adapting these processes for the use of dynamic Bayesian networks, i.e., Bayesian networks that include different states of the same variables at different time slices, in order to model an accident's evolution in time. Changes in the network structure at key time slice transitions, such as the start of molten core—concrete interaction (MCCI) process during a severe accident, should also be taken into account. In parallel, inference in a given learnt network will be implemented, which would also help with the learning method's validation.



➤ Jeudi 30 mars

10h50

Salle Bord de mer

## SESSION PARALLÈLE

### **Rejets d'aérosols dans l'enceinte**

**Président: Laurent GASNOT**

Professeur Université de Lille

Laboratoire PhysicoChimie des Processus de Combustion  
et de l'Atmosphère

**Ankita JADON**, Interactions entre radionucléides et aérosols de sodium formés lors d'un accident dans un réacteur nucléaire refroidi au sodium.

**Laura FERRY**, Évaluation des rejets en situation accidentelle dans l'installation ITER: béryllium et tritium.

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



## Sujet de la thèse :

## Interactions entre radionucléides et aérosols de sodium formés lors d'un accident dans un réacteur nucléaire refroidi au sodium

Doctorant :	Ankita JADON
Date du début de la thèse :	17/02/2015
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR
Tuteur de thèse :	Sidi SOUVI, Nathalie GIRAULT
Directeur de thèse :	Denis PETITPREZ – University of Lille 1
Ecole doctorale :	Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement, Lille 1
Financement de thèse :	IRSN

Safety assessment for Generation IV nuclear reactor designs, especially the new generation sodium-cooled fast reactors (SFRs), requires a risk-informed approach to prevent severe accidents (SAs) and mitigate their consequences in case of outside releases. To design the reactor containment of SFRs, the core disruptive accident is a determining factor resulting in the ejection of primary system sodium which burns in contact with air producing sodium aerosols. One of the key aspects of their safety evaluation is the in-containment sodium aerosols behavior and their interactions with fission products.

The objective of this research work is to study the interactions between sodium aerosols and fission products; gaseous iodine with a high radiological impact and high volatility, being the primary concern. Sodium fires resulting from SAs would produce aerosols consisting of sodium peroxides, hydroxides, carbonates, and bicarbonates. In the case of SAs, an effective uptake of iodine by sodium carbonates aerosols will reduce the radiological impact associated with gaseous iodine since aerosols can be retained by filters.

The first year of the Ph.D. was invested to theoretically understand the thermodynamics of the heterogeneous reactions between sodium carbonates and  $H_2O$  (forming bicarbonates) and fission products:  $I_2$  and HI. A comprehensive density functional theory (DFT) study using Vienna *ab-initio* simulation package (VASP) were carried out to develop an understanding of  $I_2$  and HI adsorption, as well as bicarbonate formation on the calculated lowest energy surface of  $Na_2CO_3$ , which provided adsorption energies and description of the optimized configuration of adsorbate on the stable surface. A thermodynamic extrapolation of data was performed giving thus the value of equilibrium partial pressure of iodine in presence of the most stable sodium carbonate surface (Figure 1) which would be compared with the experimental results.

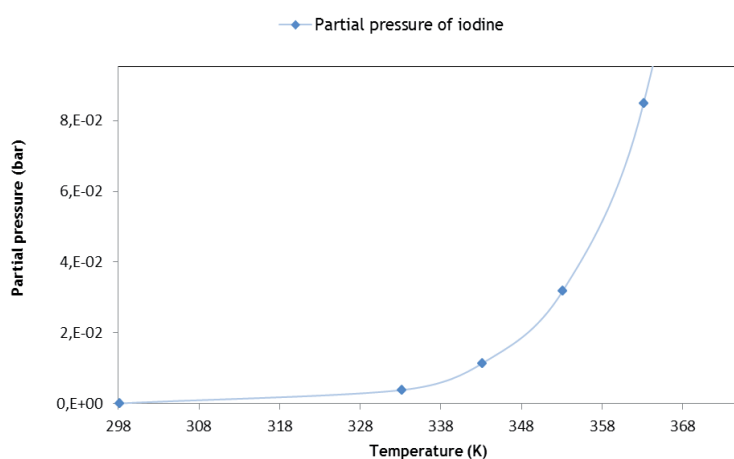


Figure 1: Evolution of equilibrium partial pressure of molecular iodine (g) in presence of the most stable sodium carbonate surface as a function of temperature.

During the second year, the heterogeneous reaction between gaseous  $I_2$  and  $Na_2CO_3$  aerosols were investigated experimentally by different techniques. Experimental conditions were varied in the range of expected in-containment conditions ( $I_2$  concentration, flow rate, and reactor temperature); first observations indicate an effective uptake of  $(I_2)_g$  on the  $Na_2CO_3$  surface.

DFT calculations on other sodium aerosol species and additional experiments are planned for the third year of Ph.D.

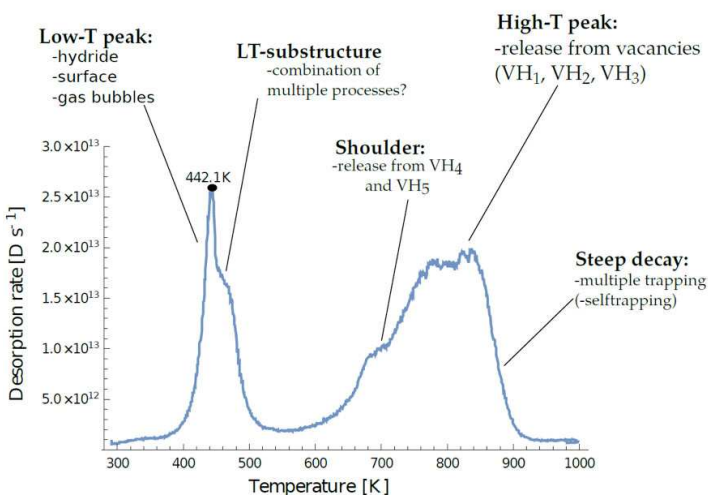
## Sujet de la thèse :

## Contribution à l'étude du comportement du tritium dans le béryllium (contexte ITER)

Doctorant :	Laura FERRY
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2014
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR
Tuteur de thèse :	François VIROT – Marc BARRACHIN
Directeur de thèse :	Yves FERRO – PIIM (AMU)
Ecole doctorale :	Aix-Marseille Université / Sciences Chimiques – ED250
Financement de thèse :	IRSN / région PACA

Le béryllium utilisé comme matériau de première paroi dans la chambre à vide d'ITER peut piéger une fraction significative du tritium du plasma. Du point de vue de la sûreté, l'importance d'étudier le comportement du tritium piégé dans un substrat de béryllium et sa désorption en fonction de la température est double. Il s'agit d'évaluer l'efficacité des dispositifs de l'exploitant pour maîtriser l'inventaire en tritium durant le fonctionnement nominal et de prédire le comportement du tritium en situation accidentelle. L'objectif de cette thèse est de déterminer par le biais d'approches de modélisation fondamentale (Théorie de la Fonctionnelle de la Densité) le comportement du tritium dans un substrat de béryllium (chemins de diffusion, barrières énergétiques associées au piégeage et à la désorption).

Après obtention des données relatives aux défauts lacunaires du substrat de béryllium et leur influence sur la diffusion et le piégeage du tritium durant les premières années, les énergies de formation des auto-interstitiels ont été déterminées. Ces énergies, ainsi que les énergies de formation des lacunes qui ont été analysées au regard des données expérimentales, mettent en évidence la prépondérance du rôle du défaut lacunaire dans les mécanismes de diffusion du tritium. Il a été montré qu'énergétiquement l'incorporation jusqu'à 5 atomes de tritium dans une seule lacune est favorable. Enfin, tous les chemins de diffusion conduisant au piégeage du tritium dans une lacune ont été analysés et étendus aux processus de multi-piégeage. L'ensemble des données obtenues a été introduit dans un modèle couplant mécanismes de réaction et de diffusion pour l'interprétation de spectres expérimentaux de thermo-désorption (TDS) obtenus au Forschungszentrum de Jülich (Allemagne). Les spectres modélisés reproduisent de manière satisfaisante les spectres TDS expérimentaux pour les faibles fluences. La mise en évidence expérimentale de l'émergence d'un pic à haute fluence et à faible température non reproduite par le calcul pourrait s'expliquer par la présence d'hydrure de béryllium ( $\text{BeH}_2$ ). Pour en tenir compte dans le modèle, les



propriétés thermodynamiques de l'hydrure de béryllium ont été calculées et comparées aux données expérimentales disponibles, montrant un bon accord. Ces données pourraient permettre de simuler la décomposition thermique de ce composé lors des expériences TDS.

Spectre TDS du béryllium après implantation de deutérium pour une fluence.

$$\phi = 1,89 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2} :$$

analyse des différents pics de relâchement.

**Sujet de la thèse :****Étude des mécanismes de sorption de l'eau sur des aérosols solides émis lors d'incendie :  
détermination des paramètres physico-chimiques d'influence**

**Doctorant :** Laura LINTIS  
**Date du début de la thèse :** 05 / 10 / 2015  
**Laboratoire :** PSN-RES / SCA / LPMA  
**Tuteur de thèse :** François-Xavier OUF  
**Directeur de thèse :** Cécile VALLIÈRES – LRGP / SAFE  
**Ecole doctorale :** Université de Lorraine / Sciences et Ingénierie des Ressources,  
Procédés, Produits, Environnement  
**Financement de thèse :** RSN

---

Lors d'un incendie dans une installation nucléaire de base (INB), les filtres à très haute efficacité (THE), structures poreuses destinées à piéger les particules entraînés par un effluent gazeux, sont colmatés en conditions humides par des suies. Les développements actuels menés sur un modèle de colmatage de ces filtres, utilisé par l'IRSN dans un code de calcul visent à prendre en compte les phénomènes de sorption/condensation de l'eau sur le dépôt de suies. La démarche expérimentale s'articule en trois grandes parties. Tout d'abord les suies sont produites à partir de combustibles isolés retrouvés dans les INB et ceci pour différentes teneurs en dioxygène. D'autres échantillons plus complexes (câbles/armoires électriques, boîte à gants) seront récupérés sur les filtres THE utilisés lors d'essais de feux d'incendie à grande échelle dans des installations de l'IRSN à Cadarache. Ensuite, les propriétés physico-chimiques, la morphologie et la microstructure de ces suies seront déterminées à l'aide de différentes techniques basées sur la spectroscopie des rayons X. Parallèlement, des mesures de sorption de l'eau seront effectuées avec la microbalance DVS (« *Dynamic Vapour Sorption* ») Vacuum, ceci pour obtenir les isothermes de sorption. Ainsi, cette deuxième étape permettra de procéder à une étude paramétrique et d'identifier les paramètres influençant la sorption de l'eau.

Le fonctionnement de la microbalance a été validé à l'aide d'un échantillon de référence (MCC Avicel Ph 101) et la répétabilité des mesures a été vérifiée avec un noir de carbone commercial (Printex 90). Les résultats de sorption ont permis de mettre en évidence l'influence notable de la taille des particules primaires d'agrégats nanométriques sur la sorption de l'eau tandis que la porosité apparente des échantillons ne semble pas avoir un impact significatif. Ces dernières conclusions doivent être confirmées à l'aide de mesures de sorption pour des échantillons de porosité plus élevée afin d'évaluer l'apparition ou non d'une phase de condensation capillaire non observée jusqu'ici.

Cette communication vise à mettre en évidence le caractère hydrophile des suies issues de différents combustibles et procédés de combustion. Des isothermes expérimentales de sorption de l'eau ont été obtenues pour des suies issues d'essais d'incendie et mettent en évidence un caractère hydrophile différent selon le combustible d'origine des suies. Ces données sont confrontées à d'autres isothermes issues de la littérature et au modèle empirique de formation multicouche GAB (Guggenheim, Anderson et De Boer) qui est utilisé dans le modèle de sorption/condensation récemment développé pour des dépôts nanostructurés d'agrégats.

➤ Jeudi 30 mars

10h50

Salle Miajou Labe

## SESSION PARALLÈLE

### **Dépôt des radionucléides sur les sols et comportement**

**Président : Marc BABUT**

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

**Jackie TAV**, Étude du dépôt par les nuages et les brouillards  
de radionucléides sur les végétaux.

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

**Lucie STETTEN**, Comportement de l'uranium dans les sédiments  
lacustres en aval d'anciens sites miniers uranifères : mesures  
spectroscopiques et modélisation géochimique.

**Sujet de la thèse :****Étude du dépôt par les nuages et les brouillards de radionucléides sur les végétaux**

---

<b>Doctorant :</b>	Jackie TAV
<b>Date du début de la thèse :</b>	13 / 10 / 2014
<b>Laboratoire :</b>	PRP-ENV / SESURE / LEREN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Olivier MASSON (IRSN) / Frédéric BURNET (CNRM)
<b>Directeur de thèse :</b>	Laurent POURCELOT - IRSN / SESURE / LEREN
<b>Ecole doctorale :</b>	Université de Toulouse - SDU2E
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / Météo-France - CNRM

---

Pour les besoins du refroidissement de leurs réacteurs, les CNPE sont placés à proximité immédiate de cours d'eau ou du littoral. Ils sont de ce fait souvent impactés par des bancs de brouillards en particulier à l'automne et au cours de l'hiver. Or les modèles opérationnels de transport/dépôts, utilisés pour simuler la contamination radioactive de l'environnement à la suite d'un accident nucléaire, ne considèrent que les dépôts par temps sec et les dépôts par la pluie. Faut-il tenir compte de la présence des brouillards comme mécanisme additionnel de dépôt de radionucléides en cas d'accident nucléaire ?

Afin de déterminer les quantités d'eau déposées par les gouttelettes de brouillards, une mesure de la masse d'eau déposée sur des végétaux est réalisée parallèlement à la collecte des eaux de brouillards sur la plateforme atmosphérique de l'ANDRA à Houdelaincourt (Meuse). La méthode de pesée développée dans le cadre de cette thèse a permis de déterminer des vitesses de dépôt pouvant atteindre  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  dans le cas d'un brouillard composée de grosses gouttelettes (diamètre médian volumique moyen de  $20 \mu\text{m}$ ). Ces vitesses élevées mettent en évidence l'importance des processus turbulents notamment dans le cadre du dépôt sur des végétaux complexes comme les cyprès.

En termes de concentration en radionucléides, nos mesures montrent que l'eau de brouillard peut être 20 fois plus concentrée que l'eau de pluie, du fait des mécanismes de transformation des gouttelettes en gouttes de pluie par apport de vapeur d'eau, entraînant une dilution au niveau des gouttes de pluie. Les mesures de masse d'eau déposée par les gouttelettes de brouillard et de la concentration en radionucléides de l'eau de brouillard, nous permettent d'évaluer à 10% la contribution du brouillard aux retombées totales en  $^{137}\text{Cs}$  sur le site d'Houdelaincourt pour l'automne-hiver 2014-2015.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité de prendre en compte ce processus de dépôt pour mieux qualifier les retombées radioactives sur des terrains en contact avec des brouillards ou des nuages (en ce qui concerne les sites d'altitudes), en particulier en situation post-accidentelle.

**Sujet de la thèse :****Comportement du radium et de ses ascendants radioactifs dans les sols  
et transfert dans les végétaux terrestres**

---

<b>Doctorant :</b>	Éric LASCAR
<b>Date du début de la thèse :</b>	01 / 10 / 2015
<b>Laboratoire :</b>	LhyGe Strasbourg & PRP-ENV / SESURE / LEREN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Laurent POURCELOT / Philippe CALMON
<b>Directeur de thèse :</b>	Sophie RIHS / François CHABAUX / LHyGeS (Université de Strasbourg)
<b>Ecole doctorale :</b>	Université de Strasbourg – ED413 (Sciences de la Terre)
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / ANDRA

---

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de la prévision du transfert des pollutions radioactives dans l'environnement, en s'intéressant au cas du radium (Ra), émetteur alpha de longue période radioactive et descendant des chaînes naturelles de l'uranium ( $^{238}\text{U}$ ) et du thorium ( $^{232}\text{Th}$ ).

Cette étude cherche à caractériser le cycle biogéochimique du Ra au sein d'un écosystème forestier, en identifiant la mobilité du Ra au sein des différents compartiments à l'interface eau-sol-plante. Elle s'appuie notamment sur les informations apportées par les déséquilibres radioactifs de la chaîne  $^{238}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ - $^{226}\text{Ra}$  et par le rapport isotopique  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ .

Le projet s'appuie sur le site d'étude expérimental de la forêt de Montiers (site OPE, Meuse, France), sur lequel la distribution du Ra entre les différentes fractions du sol (fraction échangeable, matière organique, sesquioxydes, argiles) est en cours d'analyse. En parallèle, la détermination des concentrations et du rapport isotopique  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  des solutions de sol correspondantes devrait permettre de quantifier l'origine du flux de Ra exporté hors du sol (altération versus dégradation de la litière). Ces données seront complétées par une expérience de dégradation *in-situ* de la litière mise en place depuis décembre 2015, et apportant de premières informations quant au flux de retour du Ra de la végétation vers le sol.

Outre le fait qu'il puisse permettre de tracer les différentes sources de Ra transitant dans l'environnement, le rapport  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  peut également être utilisé comme un chronomètre naturel, permettant de déterminer le temps de résidence du Ra au sein du compartiment végétal.

Pour cela, des racines fines annuelles (<2 mm) et des feuilles fraîches ont été prélevées sur trois arbres (hêtres). Le rapport  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  a été mesuré dans ces échantillons par spectrométrie  $\gamma$ . La décroissance radioactive rapide du  $^{228}\text{Ra}$  (période de 5.7 ans) comparée à celle du  $^{226}\text{Ra}$  (1600 ans), invariable à l'échelle de quelques années, permet d'obtenir un temps de résidence du Ra entre les racines et les feuilles de l'arbre allant de 3.5 à 5 ans, pour des hêtres âgés de 55 ans.

Ces données apportent ainsi une première estimation du temps de résidence du Ra dans le compartiment végétal, et pourront être comparées à celles mesurées sur une hêtraie plus ancienne (120 ans), grâce à des prélèvements réalisés sur l'Observatoire Hydrogéochimique de l'Environnement du bassin versant du Strenbach (Haut-Rhin, France).

---

**Sujet de la thèse :****Spéciation et mobilité de l'uranium dans les sols et les sédiments situés en aval d'anciens sites miniers : mesures spectroscopiques et modélisation géochimique**

**Doctorant :** Lucie Stetten  
**Date du début de la thèse :** 07 / 09 / 2015  
**Laboratoire :** PRP-DGE / SRTG / LT2S et UPMC / IMPMC / MinEnv  
**Tuteur de thèse :** Arnaud Mangeret  
**Directeur de thèse :** Guillaume Morin, Directeur de recherche CNRS-UPMC  
**Ecole doctorale :** UPMC/ED Géoscience, Ressource Naturelle et Environnement  
**Financement de thèse :** Région Ile de France (DIM R2DS)

---

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

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

Les données de spéciation de l'uranium dans les solides, obtenues par spectroscopie d'absorption des rayons X (XAS) ont permis (1) de mettre en évidence les transformations redox de l'uranium avec la profondeur ainsi que (2) de caractériser plus finement la nature des formes chimiques de l'uranium. Les analyses chimiques des solides et des eaux poreuses ont permis d'identifier les processus biogéochimiques majeurs régnant dans le milieu qui peuvent influencer le comportement redox et la mobilité de U. Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude des sédiments du lac de Saint-Clément suggèrent un contrôle important du redox de U par le relargage de  $\text{Fe(III)}_{\text{aq}}$  issu de la diagenèse précoce du sédiment. Ils font l'objet d'une publication scientifique récemment soumise à *Geochimica et Cosmochimica Acta*. De plus, l'observation de formes monomériques de U(IV) ainsi que de formes phosphatées de U(IV) met en avant l'importance de prendre en compte ces espèces dans le contrôle de la mobilité de l'uranium dans de tels systèmes anoxiques. Dans le cadre de l'étude du sol, ces résultats sont en cours de traitement et d'analyse. En parallèle, des synthèses de composés analogues aux espèces phosphatées observées dans les phases solides permettront un meilleur ajustement des données XAS obtenues sur les échantillons naturels. Des extractions chimiques de U permettront également de caractériser plus finement les formes chimiques de U et d'évaluer leur solubilité.

➤ Jeudi 30 mars

15h00

Salle Bord de mer

## SESSION PARALLÈLE

### **Dosimétrie et mesure du rayonnement**

**Président : Sylvain DAVID**

Chargé de recherche CNRS

Institut de physique nucléaire d'Orsay

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

**Nicolas TKATCHENKO**, Développement de l'utilisation de la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique sur les phanères pour la dosimétrie d'accident radiologique.

**Nadia BENABDALLAH**, Apport de la dosimétrie tissulaire et cellulaire dans le traitement des patients par alphathérapie.

**Benjamin TAMPON**, Qualification de la  $\mu$ -TPC du LNE-IRSN (chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée) comme instrument de références pour les mesures en énergie et en fluence de champs neutroniques de basses énergies (entre 8 keV et quelques MeV).



Sujet de la thèse :

Impression 3D de fantômes anthropomorphes et démonstration de leur utilité en dosimétrie interne

Doctorant :	Tiffany BEAUMONT
Date du début de la thèse :	07 / 09 / 2015
Laboratoire :	PRP-HOM / SDI / LEDI
Tuteur de thèse :	David BROGGIO
Directeur de thèse :	Didier FRANCK - IRSN
Ecole doctorale :	Université Paris-Saclay / Pheniics
Financement de thèse :	IRSN

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

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

Les efficacités de comptage des détecteurs germanium et NaI(Tl) ont été mesurées pour chaque fantôme. La différence d'efficacité entre le fantôme 5 ans et l'adulte est de 25 % pour le détecteur germanium contre 46 % pour le NaI(Tl), pour une mesure au contact. Une étude systématique a permis de montrer que quel que soit la distance de mesure, l'efficacité de comptage varie linéairement avec le volume thyroïdien. Un modèle mathématique, reproduisant la variation de l'efficacité avec la distance, a également été déterminé (cf Fig. 1). Cette étude montre que le terme dominant les erreurs de positionnement est la distance entre le détecteur et la thyroïde.

Par ailleurs, dans le cas des pathologies bénignes de la thyroïde un jeu de fantôme similaire a été utilisé dans un service de médecine nucléaire afin de quantifier l'activité retenue dans la thyroïde. Pour une sonde NaI(Tl), le facteur d'étalonnage utilisé en routine clinique est modifié entre -2 % et +8 % selon le volume thyroïdien. Une variation du coefficient d'étalonnage en fonction du volume est également observée avec une gamma-camera en mode planaire.

Actuellement, des fantômes de poitrine sont développés par impression 3D afin d'améliorer la mesure pulmonaire des actinides chez les travailleuses du nucléaire.

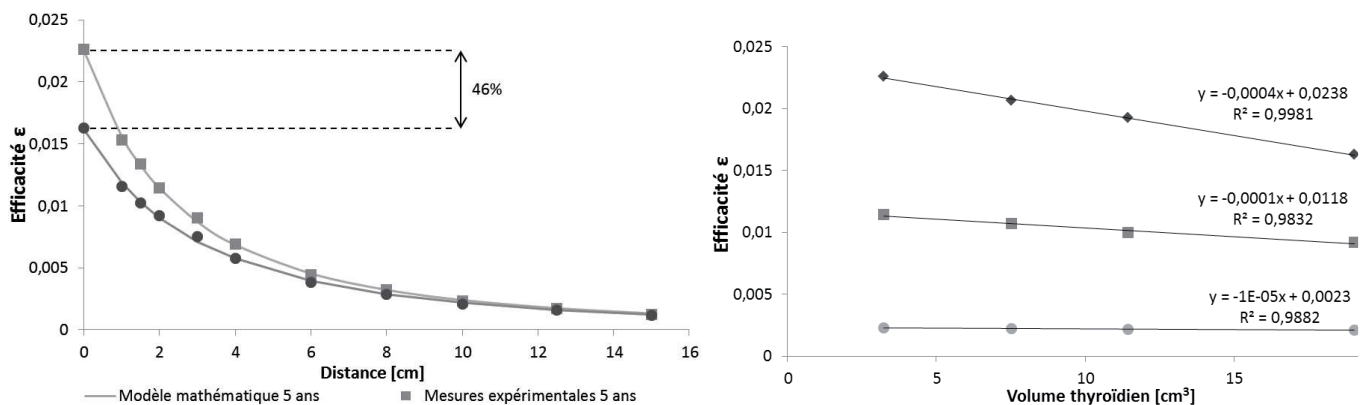


Figure 1. (à gauche) Variation de l'efficacité, expérimentale et théorique, en fonction de la distance fantôme-détecteur NaI(Tl), (à droite) variation de l'efficacité de comptage en fonction du volume thyroïdien pour différentes distances fantôme-détecteur NaI(Tl).

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Nicolas TKATCHENKO</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>Septembre 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SDE / LDRI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>François TROMPIER</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Didier GOURIER Chimie ParisTech</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPMC / ED397</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

Ce travail a pour objectif de développer de nouveaux moyens en dosimétrie d'accident radiologique, notamment lors d'irradiations localisées au niveau des mains. Cette typologie d'accident est récurrente, mais il est souvent impossible ou extrêmement compliqué d'estimer les doses reçues. L'IRSN développe une approche innovante basée sur la quantification, dans les ongles, des radicaux libres radio-induits par spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE).

Si cette approche présente de nombreux avantages (facilité du prélèvement, cartographie de la dose absorbée) l'analyse des spectres RPE s'avère complexe et de nombreux paramètres influent sur la production et la stabilité des radicaux mesurés. En effet, parmi tous les signaux RPE d'un échantillon d'ongle irradié, un seul peut être utilisé pour la dosimétrie (RIS 5), car suffisamment stable. Malheureusement, cette composante radio-induite de faible intensité se superpose à un intense signal endogène (BKS) présentant les mêmes caractéristiques spectrales. De plus, ce BKS varie fortement en intensité d'un individu à l'autre ainsi qu'avec le taux d'humidité. Dans cette configuration, la réalisation d'une dosimétrie robuste demeure très compliquée. Néanmoins, un premier protocole original dédiés aux fortes doses (>10 Gy) a permis de réaliser les premières expertises pour le compte de REACTS (USA) de l'AIEA. Cependant, aucune solution n'a pu être proposée ou validée pour les doses inférieures à 10 Gy.

Pour ces faibles doses, il est primordial de développer une méthode de séparation des composantes endogène et radio-induite. En premier lieu, il a été nécessaire d'étudier l'origine du BKS ainsi que les paramètres influant sur sa variabilité. Ce travail, présenté ici, a permis de montrer d'une part, une forte variabilité de son intensité inter-individus (jusqu'à 60%) et d'autre part sa forte dépendance au taux d'humidité présent dans l'échantillon. Il est donc exclu d'utiliser des intensités moyennes du BKS pour estimer l'intensité du RIS 5 et il est indispensable de contrôler le taux d'humidité intrinsèque.

Des simulations numériques couplées à des traitements chimiques ont également permis d'avancer une hypothèse quant à la nature de l'espèce paramagnétique responsable de ce BKS. Cette donnée est essentielle pour identifier les méthodes potentielles de séparation des composantes (chimiques, ultrasons,...).

Enfin, sachant que les radiations UVA et UVB induisent les mêmes radicaux libres que le BKS, une étude a été menée pour établir un possible lien entre cette exposition et la formations des espèces radicalaires considérées jusqu'à présent comme endogènes.

L'autre paramètre influant sur la performance de la dosimétrie est la variabilité de la réponse en dose. En parallèle des études sur le BKS, des courbes de réponse en dose ont été réalisées à l'aide de rayonnements gamma et UV afin de caractériser la variabilité inter et intra-individus.

Les études menées jusqu'à présent permettent de mieux comprendre la physico-chimie des ongles sous irradiation. La prochaine étape visera à tester différentes méthodes ou approches de séparation des signaux pour ensuite mettre en place un protocole de dosimétrie complet.

**Sujet de la thèse :****Apport de la dosimétrie tissulaire et cellulaire  
dans le traitement des patients par alphathérapie**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Nadia BENABDALLAH</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15 / 09 / 2014</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SDI / LEDI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Aurélié DESBRÉE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Didier FRANCK (IRSN)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris-Saclay / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La radiothérapie interne vectorisée repose sur l'administration d'un radiopharmaceutique, qui va se fixer dans les régions tumorales afin de les détruire. Récemment, le développement de nouveaux radiopharmaceutiques, notamment des émetteurs alpha, rend la discipline particulièrement prometteuse. Effectivement, leurs propriétés (dépôt d'énergie élevé sur un faible parcours) leur confèrent, par rapport aux émetteurs  $\beta^-$ , une plus grande cytotoxicité pour les cellules tumorales tout en limitant l'irradiation non désirée aux tissus sains.

L'objectif dans le domaine est de déterminer, pour chaque patient, l'activité à injecter permettant d'obtenir un maximum de dose à la tumeur tout en ne dépassant pas les limites de dose aux organes à risques. Pour les radiopharmaceutiques émetteurs alpha, l'évaluation dosimétrique représente un véritable challenge au vu du faible parcours de ces particules et constitue l'enjeu de cette thèse qui porte plus particulièrement sur le  $^{223}\text{Ra}$  (Xofigo®), premier radiopharmaceutique émetteur alpha à avoir obtenu l'autorisation de mise sur le marché pour le traitement de patients atteints de métastases osseuses du cancer de la prostate.

La première partie de la thèse a été la mise en place d'un protocole d'imagerie à l'aide d'une gamma-caméra afin de connaître la distribution du radiopharmaceutique à l'échelle macroscopique. Ce protocole a été accepté dans le cadre d'un essai clinique multicentrique (HEGP, Cochin, IGR, Caen) de phase I/II dédié au traitement par le  $^{223}\text{Ra}$  des métastases osseuses du cancer rénal. Par ailleurs, la moelle osseuse est l'organe limitant de cette thérapie. Des calculs de dose adaptés aux régions radiosensibles, que sont la moelle rouge et l'endoste, ont été réalisés à l'échelle microscopique en utilisant les modèles de l'os les plus réalistes à l'heure actuelle et le code de calcul MCNP6. Enfin, la connaissance de la répartition du radionucléide à l'échelle microscopique est aussi importante pour relier au mieux la dose aux effets biologiques. Des modèles animaux sains et présentant des métastases osseuses dérivant d'un cancer du rein ou de la prostate ont été développés et validés en collaboration avec le CNRS à Orléans. La différence de fixation et de répartition du  $^{223}\text{Ra}$  entre les tissus sains et les métastases pour les différents modèles va être étudiée à l'aide d'images autoradiographiques réalisées en collaboration avec l'INSERM de Nantes.

Les travaux développés dans cette thèse permettront d'aller plus loin dans la personnalisation de la dosimétrie pour d'autres radiopharmaceutiques émetteurs alpha.

**Sujet de la thèse :**

**Qualification de la  $\mu$ -TPC du LNE-IRSN (chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée) comme instrument de références pour les mesures en énergie et en fluence de champs neutroniques de basses énergies (entre 8 keV et quelques MeV)**

<b>Doctorant :</b>	<b>Benjamin TAMPON</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>14 / 09 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SDE / LMDN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Véronique LACOSTE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Daniel SANTOS – CNRS / LPSC</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Ecole doctorale de physique, Grenoble-Alpes</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancé LNE - IRSN</b>

Le Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (LMDN) est le Laboratoire Associé au Laboratoire National de métrologie et d'Essais pour les grandeurs de référence associées à la dosimétrie des neutrons. Les installations de production de champs neutroniques du LMDN (installations de référence sont au nombre de trois :

- l'irradiateur VanGogh abritant des sources de  $^{241}\text{Am}$ -Be et de  $^{252}\text{Cf}$  ;
- le dispositif de production de champs réalistes CANEL ;
- l'accélérateur AMANDE, délivrant des champs neutroniques mono-énergétiques de quelques keV à 20 MeV.

Dans le cadre de sa mission d' « amélioration des définitions [...] des unités de base », le LMDN s'est engagé dans le projet de développement d'un détecteur gazeux ( $\mu$ -TPC pour *micro Time Projection Chamber*), qui devrait permettre à terme de pouvoir mesurer directement<sup>(1)</sup> la distribution en énergie de champs neutroniques. Le travail de thèse en cours s'intéresse aux énergies supérieures à 500 keV.

Ce projet se déroule en collaboration avec l'équipe MIMAC du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC/UJF/CNRS-IN2P3/INP) qui a développé ce détecteur, initialement pour la détection directionnelle de matière noire. En effet l'interaction de ces particules avec la matière induit des reculs nucléaires, comme pour les neutrons. Ainsi le même principe de détection peut être utilisé pour détecter des neutrons.

L'objectif de ce projet est de développer et d'optimiser un détecteur capable de mesurer la distribution en énergie de la fluence neutronique entre quelques keV et 5 MeV. La thèse précédente a montré que le détecteur fonctionne pour des champs monoénergétiques entre 10 keV et 565 keV, il faut donc à présent réaliser des mesures au-delà du MeV et être capable de mesurer la distribution en énergie de la fluence de champs étendus. Pour cela il faut :

- maîtriser le fonctionnement du dispositif gazeux,
- réaliser des campagnes de mesures sur des installations de référence
- déterminer par simulations la fonction de réponse du système
- maîtriser les incertitudes associées à chaque paramètre et les propager aux grandeurs d'intérêt,

Depuis le début de la thèse, trois campagnes de mesures sur champs neutroniques étendus ont été réalisées. L'accent est mis à présent sur l'analyse des données, le calcul de la fonction de réponse du détecteur ainsi que sur la détermination des incertitudes associées aux résultats de mesures.

(1) C'est-à-dire sans étalonnage préalable auprès de sources de neutrons.



➤ Jeudi 30 mars

15h00

Salle Miajou Labe

## SESSION PARALLÈLE

### **Confinement et propagation des aérosols et fumées**

**Président : Michel QUINTARD**

Directeur de recherche CNRS

Institut de mécanique des fluides de Toulouse

Président du Comité de visite de l'IRSN

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

**Youssef ALILOU**, Impact sur le colmatage en régimes permanent et transitoire des écoulements d'air induits par le plissage de médias filtrants THE.

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

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

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

## Sujet de la thèse :

**Mécanismes de transfert aéraulique au travers d'ouvertures : application à l'efficacité du confinement dynamique d'enceintes de chantiers**

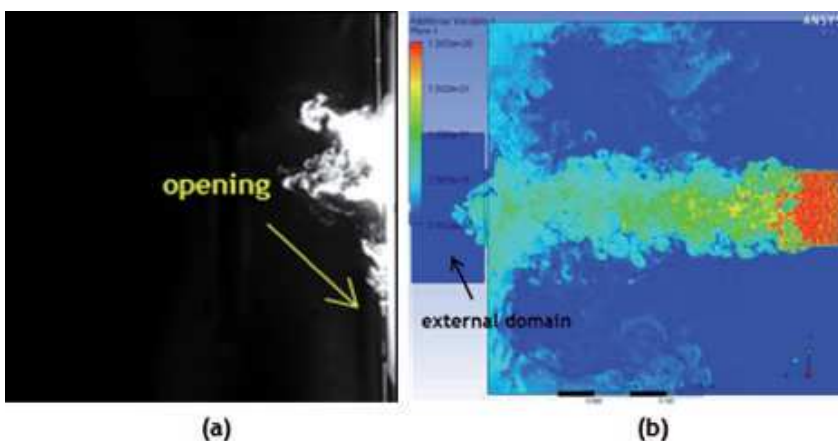
Doctorant :	Salima KAISSOUN
Date du début de la thèse :	17/11/2014
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LEMAC
Tuteur de thèse :	Laurent RICCIARDI, Corinne PREVOST
Directeur de thèse :	Eric CLIMENT – IMFT, Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS
Ecole doctorale :	Ecole Doctorale Mécanique Energétique, Génie Civil & Procédés - MEGeP
Financement de thèse :	IRSN / EDF-DIPDE

Les chantiers de maintenance et d'assainissement dans les centrales nucléaires nécessitent la mise en place d'enceintes ventilées autour des zones contaminées afin de limiter la propagation de la contamination à l'environnement extérieur. Ces enceintes sont mises en dépression par rapport au local dans lequel elles sont implantées, selon le principe du confinement dynamique : l'air rentre dans l'enceinte au travers d'ouvertures inhérentes à la conception de l'enceinte ou accidentelles. Toutefois, en raison des activités d'exploitation, il est possible que l'écoulement au droit d'une ouverture subisse des inversions locales et instationnaires conduisant à transporter la contamination à l'extérieur de l'enceinte (phénomène communément appelé 'rétrodiffusion des polluants'). Contrairement à la plupart des études rapportées dans la littérature, qui s'intéressent au confinement dynamique au niveau des grandes ouvertures, la présente étude porte sur des petites ouvertures rectangulaires et circulaires dont le diamètre hydraulique n'excède pas 10 cm.

Le principal objectif de la thèse est de reproduire expérimentalement et numériquement, dans le champ proche d'une ouverture calibrée, les conditions aérauliques susceptibles de donner lieu au phénomène de rétrodiffusion. Les travaux de recherche réalisés en 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> année ont permis d'identifier des phénomènes perturbateurs tels que le déplacement d'un obstacle à l'extérieur de l'enceinte ou la présence d'un écoulement d'air sous la forme d'un jet turbulent (libre/pariétal, interne/externe) venant interagir avec l'écoulement principal à l'ouverture. Une enceinte expérimentale de 0,3 m<sup>3</sup> a ensuite été mise en œuvre dans le but de quantifier la quantité de polluant (gazeux) rétrodiffusée pour les différents scénarios identifiés.

Les résultats sont présentés sous formes de visualisations laser de l'écoulement de rétrodiffusion ainsi que de champs PIV (Particle Image Velocimetry) pour caractériser les écoulements mis en jeu. La quantification de la rétrodiffusion est réalisée par la technique de traçage gazeux à l'hélium. Les effets de la surface, de la forme et de la profondeur de

l'ouverture sont aussi étudiés. En perspectives, les résultats expérimentaux seront confrontés aux résultats de calculs de mécanique des fluides en RANS (moyennage temporel des équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles) et LES (simulation des grandes échelles) réalisés à l'aide du code ANSYS CFX.



(a) visualisation laser de l'écoulement de rétrodiffusion à l'extérieur de l'enceinte, (b) simulation aux grandes échelles - cas de compétition entre jets.

**Sujet de la thèse :****Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE**

Doctorant :	Youssef ALILOU
Date du début de la thèse :	24 / 11 / 2014
Laboratoire :	PSN-RES / SCA / LECEV
Tuteur de thèse :	Soleiman BOURROUS / Thomas GÉLAIN
Directeur de thèse :	Dominique THOMAS / Nathalie BARDIN-MONNIER - LRGP
Ecole doctorale :	Université de Lorraine
Financement de thèse :	IRSN / Math2market

Les filtres THE (Très Haute Efficacité) jouent un rôle essentiel dans la protection de l'environnement en assurant le confinement des radionucléides dans les installations nucléaires. La connaissance et l'anticipation du comportement de ces équipements en situation normale et accidentelle (incendie) est donc un enjeu important pour l'IRSN, afin de garantir la sûreté des INB (Installations Nucléaires de Base). De nombreux travaux expérimentaux menés dans ce cadre (*Del Fabbro 2003, Mocho et al. 2011, Bourrous 2014*) ont permis de montrer la diversité et la complexité des phénomènes mis en jeu. Pour cette thèse, dont l'objectif est de développer des modèles prédictifs de perte de charge pour les filtres plissés THE, une stratégie a été adoptée consistant à découpler les phénomènes physiques intervenant dans le colmatage d'un filtre plissé THE à l'échelle du pli, selon une double approche expérimentale et numérique.

Ainsi, la première partie de ce travail concerne l'étude des écoulements d'air dans un filtre THE plissé vierge. Une technique de  $\mu$ -PIV a été adaptée pour mesurer les champs de vitesse au sein d'un pli THE. En se basant sur ces mesures, des codes de calcul (ANSYS CFX et GeoDict) ont été validés. La combinaison de ces deux approches, expérimentale et numérique, a permis de modéliser le champ de vitesse à l'intérieur d'un pli et d'établir un modèle physique permettant de prédire l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé THE en fonction de la vitesse de filtration. Celui-ci a pu être confronté aux valeurs expérimentales obtenues lors de la thèse de Del Fabbro (2001).

La deuxième partie consiste à étudier le comportement du filtre soumis à un aérosol colmatant. Un banc expérimental permettant de mesurer l'évolution des différents paramètres caractérisant le colmatage du filtre a été développé. Les données obtenues sur ce banc constitueront, par la suite, les paramètres d'entrée des codes de calcul utilisés. Un modèle de colmatage est en cours développement.

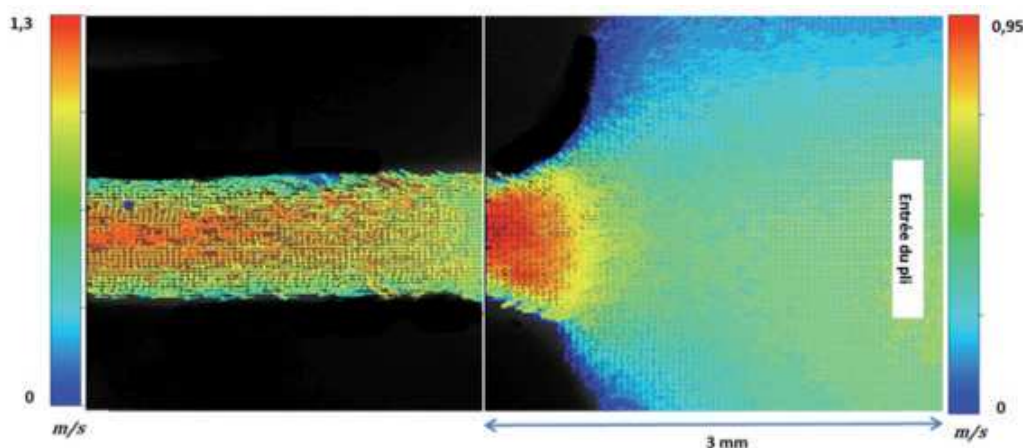


Figure 1 :  
champ de vitesse  
à l'entrée d'un pli  
de filtre  
plissé THE.



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

<b>Doctorant :</b>	<b>Romain HANOUZET</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Samuel VAUX</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Olivier VAUQUELIN - AMU</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Aix Marseille Université IUSTI</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

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

Deux principales problématiques émergent dans cette étude : l'effet de la pente importante et l'impact des alvéoles sur la propagation des fumées et la stratification. Pour répondre à ces enjeux, des essais sont réalisés sur une maquette aéraulique d'un tunnel à échelle réduite installée à l'IUSTI (Marseille). La maquette permet un contrôle de la pente (jusqu'à 20%). Un dispositif d'ensemencement et de contrôle de la masse volumique, par un mélange d'air et d'hélium, permet par similitude de reproduire la flottabilité et la température des fumées générées par un feu. Des mesures seront réalisées afin de constituer une base de données permettant de valider les codes CFD (mécanique des fluides) de simulation d'incendie (ISIS).

Dans un premier temps, nous nous focalisons sur l'avancée au cours du temps du courant de densité généré par un relargage instantané d'un volume de mélange air/hélium dans un tunnel. Afin de distinguer la différence de comportement entre les écoulements Boussinesq (écart de densité faible par rapport au milieu ambiant) et non-Boussinesq (écart de densité important), nous étudions l'impact de la masse volumique initiale du mélange sur la propagation du courant gravitaire. Les résultats permettent de mettre en évidence l'impact de la masse volumique sur la vitesse de propagation.

Ensuite, l'ajout d'un tronçon transverse à un tunnel a permis de représenter une alvéole. Nous nous sommes intéressés à l'épaisseur de la couche de fumée issue d'une source continue de flottabilité (panache). Cette épaisseur a été mesurée en différentes positions (en amont et en aval de l'alvéole) afin de quantifier l'impact d'une alvéole sur l'écoulement de fumées dans la galerie principale. Ces expériences ont permis de balayer une grande plage du nombre de Richardson (Boussinesq et non-Boussinesq). Ces essais mettent en évidence la dépendance de l'épaisseur de la couche de fumées en fonction du nombre de Richardson ainsi qu'un comportement différent en amont et en aval de l'alvéole.

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

**Doctorant :** Adithya RAMANATHAN KRISHNAN  
**Date du début de la thèse :** 04 / 01 / 2016  
**Laboratoire :** PSN-RES / SA2I / LIE  
**Tuteur de thèse :** Fabien DUVAL  
**Directeur de thèse :** Pierre SAGAUT / Christophe FRIESS – M2P2, Aix-Marseille University  
**Ecole doctorale :** ED 353, Ecole Centrale, Marseille  
**Financement de thèse :** IRSN

---

In the framework of safety studies conducted by IRSN, an important issue concerns the risk of hydrogen accumulation in the upper part of the nuclear containment under the effect of buoyancy and the persistence of such stratification. In this context, the aim of this work revolves on building a turbulence model, focusing on its predictive capabilities for such variable density flows. For such flows, using standard RANS models is limited because of its predictive capabilities (need for an ad-hoc recalibration of the coefficients) while performing LES involves high computational costs. In this framework, the use of a hybrid RANS/LES approach seems to be attractive as it combines the speed of RANS and the ability of LES to capture unsteadiness in the flow. Hence, the objective of this work is to develop and to study the potentialities of a seamless hybrid RANS/LES approach in a partially integrated turbulence modeling (PITM) framework for variable density flows.

The PITM method is a continuous hybrid approach that uses transport equations to model the sub-filter scales (SFS). By utilizing a higher order SFS model capable of capturing better flow physics we are hopeful to have a coarser grid. Here, an explicit algebraic Reynolds stress model (EARSM) is used. EARSM is incomplete without a platform model and Menter's BaSeLine (BSL) model is chosen as it is known to reproduce correct velocity profile in the near wall region without the need for viscous corrections. The platform model is unaltered except for the turbulent viscosity in its diffusion terms. A simple analysis reveals that the EARSM closure acts like the SST limiter in terms of the variable  $C_\mu$  coefficient. EARSM model has been verified for a number of test cases in a RANS context.

The hybrid approach may produce low amount of resolved turbulence as the model fails to initiate large scale unsteady motions, leading to flow relaminarization. This corresponds to the grey area between the RANS and LES regions in zonal hybrid approaches. To tackle this, a forcing term consisting synthetic eddies has to be introduced in the momentum equation ensuring in producing good levels of resolved turbulence. As a first step, the generation of synthetic turbulence alone is studied. The Random Fourier modes (RFM) method is employed for the generation. Important properties of the generated turbulence are verified for a homogeneous-isotropic turbulence case. Calculations involving spatially developing flows have been performed by introducing fluctuating velocity using synthetic turbulence which provides satisfactory results.

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Mohamed BELERRAJOUL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Fabien DUVAL</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel QUINTARD, Yohan DAVIT et Olivier SIMONIN (Institut de mécanique des fluides de Toulouse)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>SDU2E - Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

Les risques d'explosion de poussières sont fréquemment rencontrés dans les installations industrielles. Les secteurs industriels concernés sont nombreux (industrie pharmaceutique, céréalière, ...) et les composés pulvérulents mis en jeu sont d'une grande diversité (matières organiques, ...). Dans le secteur nucléaire, un des scénarios étudiés traite par exemple du risque d'explosion de poussières de graphite lié aux opérations de démantèlement des réacteurs UNGG (Uranium Natural Graphite Gaz). D'autres types de poussières sont concernés par le risque d'explosion comme par exemple les poudres de zirconium mises en œuvre dans la fabrication des gaines de combustible ou des poussières de tungstène ou de béryllium pouvant être remises en suspension dans le tore ITER de Cadarache en cas d'accident de perte de vide.

Le problème considéré est un problème de combustion d'un mélange gaz-particules pour lequel il s'agit de développer un modèle permettant de prédire la vitesse laminaire de flamme pour différents types de particule (graphite, fer, aluminium). En supposant que les échelles de variations significatives dans la phase porteuse et les échelles de variation locales induites par la présence des particules sont convenablement séparées, la démarche proposée consiste à décrire la phase continue de façon eulérienne et la phase dispersée de façon lagrangienne quasi-ponctuelle. Les développements sont ainsi menés dans le cadre d'une description multi-échelle, de l'échelle de la particule où des modèles de combustion sont proposés en fonction du type de particule, à l'échelle de description macroscopique qui correspond ici aux échelles de variations significatives dans la phase continue. Les équations de transport de la phase porteuse sont filtrées à une échelle beaucoup plus grande que la taille des particules, mais suffisamment petite devant l'échelle caractéristique des variations significatives dans la phase porteuse. A l'échelle du filtre, le mélange étant supposé dilué, les termes d'échange entre la phase porteuse et les particules sont modélisés sur la base de résolution de problèmes de couche limite au voisinage d'une particule isolée.

Nous nous intéressons dans un premier temps à la combustion de particules de graphite de diamètre  $d_p < 100 \mu\text{m}$ . Le mécanisme d'oxydation des particules est décrit à partir du modèle à film unique communément adopté pour cette gamme de diamètre. Des simulations de combustion d'une particule isolée et à l'échelle de quelques particules sont réalisées. Ces premiers calculs viennent illustrer la démarche proposée pour estimer la vitesse laminaire de flamme d'un mélange gaz-poussières.

➤ Jeudi 30 mars

17h50

Salle Bord de mer

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Matériaux : de l'atomistique au VER**

**Président : Guy TRÉGLIA**

Directeur de recherche CNRS

Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille (CINaM)

**Paul EYMEOD**, Modélisation atomistique de la fragilisation des gainages combustibles nucléaires par les hydrures.

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

**Mathilde GESTIN**, Étude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température des alliages de gaine de crayons de combustible des centrales nucléaires.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Paul EYMEUD
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Fabienne RIBEIRO
Directeur de thèse :	Guy TREGLIA - CNRS
Ecole doctorale :	Aix-Marseille Université / ED352
Financement de thèse :	IRSN

Au cours de son utilisation en réacteur, la gaine en zircaloy des crayons combustibles s'oxyde en surface, ce qui conduit à une libération d'hydrogène qui peut diffuser et précipiter au sein de la matrice en zirconium. Ces précipités d'hydrure fragilisent le matériau notamment par abaissement de la ductilité et de la limite de rupture, et peuvent, s'ils subissent une sollicitation importante, être le lieu d'amorçage de fissures. Ceci constitue un enjeu de sûreté nucléaire, car l'intégrité de la gaine, première barrière de sûreté, doit être maintenue durant l'ensemble du cycle de vie du crayon combustible : fonctionnement en réacteur, transport et entreposage. Pour répondre à cet enjeu, il s'impose d'analyser les mécanismes régissant la précipitation et la dissolution des hydrures de zirconium sur une gamme étendue de temps, de température et de contraintes mécaniques.

Face aux nombreuses incertitudes relatives à la nature, la stabilité et les cinétiques de transformation de ces hydrures, les objectifs de mon travail de thèse se déclinent en deux axes principaux: la clarification du diagramme de phases Zr-H, et la quantification du lien entre hydrures et contraintes locales dans le métal, par des approches de type simulations Monte-Carlo d'équilibre. De telles simulations nécessitent un modèle énergétique atomistique présentant un bon compromis en termes de précision et de coût numérique.

Partant du potentiel à N-corps en liaisons fortes développé par A. Dufresne (thèse IRSN soutenue en 12/2014), précis mais trop coûteux numériquement pour les approches thermostatistiques, un modèle d'Ising effectif a été dérivé, modélisant l'énergie d'ordre du système par une somme d'interactions de paires hydrogène-hydrogène. Cette démarche a mis en évidence une prédominance des interactions entre atomes d'hydrogène premiers et troisièmes voisins (cf. figure). Parallèlement, une comparaison avec des calculs DFT (Théorie de la Fonctionnelle de la Densité) est en cours, dans le cadre d'échanges avec l'UMET Lille (ANR SIZHYP). Ces interactions effectives vont à présent pouvoir être introduites dans un programme de simulation Monte-Carlo grand canonique, pour réaliser l'exploration thermostatistique du diagramme de phase du système Zr-H.

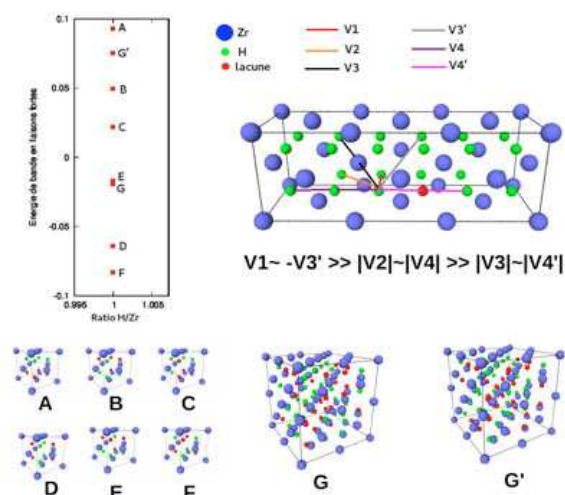


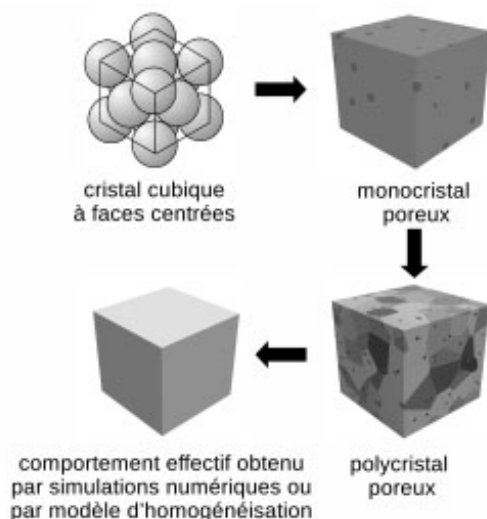
Figure 1 : partie supérieure : à gauche énergies de formation des différentes phases d'hydrures décrites dans la partie inférieure de la figure, et à droite définition et quantification des interactions de paires effectives entre atomes d'hydrogène.

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

Doctorant :	Louis JOÉSSEL
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Mihail GARAJEU – CNRS / Laboratoire de mécanique et acoustique (LMA) MARTIN IDIART - UNLP
Ecole doctorale :	ED 353 Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
Financement de thèse :	IRSN

Ce travail concerne l'étude du vieillissement des internes de cuve dans les réacteurs à eau sous pression. Les internes de cuve, principalement en acier inoxydable austénitique, sont soumis à une irradiation élevée durant leur utilisation en réacteur. Une forte dose d'irradiation modifie la microstructure de ce matériau en entraînant la formation de défauts tels les boucles de Frank, puis l'apparition de cavités. L'évolution microstructurale se traduit tout d'abord à l'échelle macroscopique par un durcissement et une fragilisation du matériau.

A l'échelle microscopique, ces aciers irradiés présentent une structure polycristalline, potentiellement poreuse (cavités intragranulaires dues à de forts niveaux d'irradiation). L'objectif de ce travail de thèse est de modéliser le comportement viscoplastique d'un acier inoxydable austénitique fortement irradié pour une porosité donnée à l'aide de méthodes micromécaniques innovantes. Deux approches sont exploitées. La première démarche consiste à simuler numériquement le comportement micromécanique d'un polycristal poreux grâce à une loi de comportement cristalline [Han, 2012] prenant en compte l'évolution des boucles de Frank avec le chargement. Les simulations en champs complets s'appuient sur la méthode Fast Fourier Transform implémentée dans le logiciel CraFT, développé au LMA. La taille des cavités est supposée petite devant la taille des grains du polycristal. La deuxième démarche consiste à construire un modèle pour le comportement macroscopique d'un monocristal poreux par une méthode d'homogénéisation en se basant sur l'approche des laminés infinis [Idiart, 2008].



Lors de la première année de thèse, des simulations en champs complets ont déjà été effectuées sur des structures polycristallines denses et comparées avec succès à des essais issus de la littérature. Des calculs sur des polycristaux poreux vont être réalisés. Parallèlement, dans le but de construire un modèle pour le comportement effectif d'un monocristal poreux viscoplastique sous chargement hydrostatique a été obtenue analytiquement. Les prévisions du modèle ont été comparées avec des résultats de simulations numériques. Le modèle est en accord avec les résultats des simulations. La prochaine étape consiste à généraliser le modèle obtenu pour tout type de chargement.

## Sujet de la thèse :

## Etude des phénomènes d'oxydation sous air et vapeur d'eau à haute température des alliages de gaine de crayons de combustible des centrales nucléaires

Doctorant :	Mathilde GESTIN
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2015
Laboratoire :	PSN-RES/SAG/LEPC
Tuteur de thèse :	Olivia COINDREAU
Directeur de thèse :	Véronique PERES / Michèle PIJOLAT - EMSE
Ecole doctorale :	EMSE
Financement de thèse :	IRSN / ANR DENOPI

Les piscines de stockage de combustible des réacteurs nucléaires permettent d'entreposer le combustible, soit dans l'attente que sa puissance résiduelle soit suffisamment faible pour permettre son évacuation définitive hors du site, soit parce qu'il est destiné au rechargement du réacteur à l'arrêt. Dans le cadre d'un éventuel accident, une perte de refroidissement pourrait conduire au dénoyage et à l'échauffement des assemblages de combustible. La réaction d'oxydation des gaines de combustible en alliage de zirconium par la vapeur d'eau et par l'air pourrait conduire à la dégradation des crayons provoquant le relâchement des produits radioactifs.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ANR Programme investissement d'avenir DENOPI (DENOyage de Piscine). Ils portent sur l'étude des phénomènes d'oxydation de l'alliage de zirconium (Zircaloy-4) pré-oxydé à haute température dans un mélange de gaz composé d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau. Les échantillons étudiés sont des plaquettes pré-oxydées de Zircaloy-4 ; la couche de zircone d'environ 30  $\mu\text{m}$  simule la couche de corrosion formée sous eau en réacteur sur les gaines de combustible. Elle est produite par oxydation dans un four à 425°C sous  $\text{O}_2$  humidifié pendant 250 jours. Le but de nos travaux est de déterminer les mécanismes d'oxydation du Zircaloy-4 pré-oxydé et d'acquérir des données cinétiques qui permettront d'établir le modèle cinétique.

La prise de masse due à l'oxydation des échantillons a été mesurée au moyen d'une thermobalance symétrique. Les essais réalisés en palier isotherme à 850°C sous air et vapeur d'eau confirment

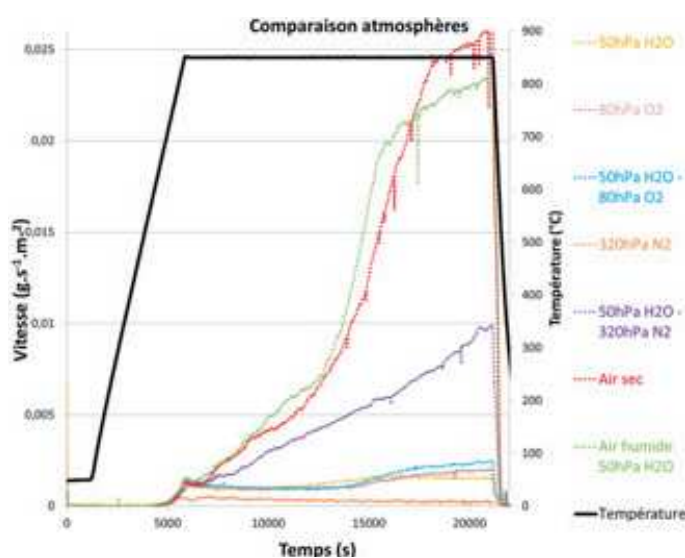


Fig. 1 : Effet de l'atmosphère sur l'oxydation du Zy-4 pré-oxydé.

l'effet néfaste de l'azote lorsqu'il est associé à l'oxygène et/ou à la vapeur d'eau pour des teneurs variant de 0 à 280 hPa. On peut en effet observer sur la fig. 1 que la vitesse d'oxydation, qui est faible et relativement constante avec de l'oxygène et/ou de la vapeur d'eau, est plus importante et augmente avec le temps quand l'atmosphère contient en plus de l'azote. Contrairement à des plaquettes de Zircaloy-4 vierge, une dépendance en pression partielle d'azote et d'oxygène est observée. La mesure de la teneur en hydrogène dans le métal après oxydation montre une corrélation entre la pression partielle de vapeur d'eau et la concentration en hydrogène. De plus, l'épaisseur de la couche de pré-oxyde semble jouer un rôle significatif sur la cinétique d'oxydation.

Des tests cinétiques utilisant la méthode des décrochements en température et en pression partielle des gaz, associés à la caractérisation fine des échantillons par microscopie, Infrarouge, Raman, DRX et tomographie X sont en cours. Ils permettront de proposer un modèle cinétique capable de décrire la vitesse d'oxydation des gaines pré-oxydées.

➤ la soirée de Jeudi 30 mars







➤ Vendredi 31 mars

09 h 15

Salle Bord de mer

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Transfert des radionucléides**

#### **Présidente : Patsy THOMPSON**

Directrice de l'évaluation et de la protection de l'environnement  
Commission canadienne de sûreté nucléaire  
Membre du Conseil scientifique de l'IRSN

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

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

“ **Loïc DUCROS**, Comportement et devenir du tritium au sein  
des hydrosystèmes continentaux côtiers méditerranéens.

**Hugo RENARD**, Modélisation à pas de temps horaire des transferts  
de tritium dans un écosystème prairial.

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

Doctorant :	Thomas FERRACCI
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2015
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LRTE
Tuteur de thèse :	Patrick BOYER
Directeur de thèse :	Fabien ANSELMET - CNRS
Ecole doctorale :	AMU / Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / Région PACA

Dans les rivières, les radionucléides sont transportés sous des formes dissoutes et particulaires fixées aux particules en suspension et aux sédiments de fond. Les fractions particulaires dépendent en premier lieu de la taille des particules ; plus elles sont fines, plus leur surface spécifique ( $m^2/m^3$ ) est importante et plus la sorption des radionucléides est favorisée. La connaissance de la granulométrie des matières en suspension est donc nécessaire pour déterminer les transferts des radionucléides dans les rivières.

La charge en suspension des rivières est évaluée par des lois empiriques de type charge-débit qui n'informent pas sur la granulométrie des particules. Le but de cette thèse est de proposer une approche pour évaluer cette granulométrie à partir de ces relations et des caractéristiques des cours d'eau.

L'étude bibliographique conduit à décomposer les relations charge-débit en fonction des contributions de trois classes granulométriques (argiles ( $< 10\mu m$ ), silts ( $10$  à  $60\mu m$ ), sables ( $> 60\mu m$ ) évaluées par des relations qui donnent la charge d'équilibre de ces classes en fonction des conditions d'écoulement et des propriétés des cours d'eaux. La détermination des paramètres de ces relations est effectuée selon deux approches : 1) la compilation de relations charge-débit et des propriétés des cours d'eaux associés et 2) la réalisation d'expérimentation de laboratoire.



La compilation des relations charge-débit s'appuie sur plusieurs sources d'information telles que les données de la station *Station Observatoire du Rhône en Arles* (SORA) qui est l'une des rares à renseigner la charge en suspension et la granulométrie et la base de données américaine de l'USGS qui met à disposition les données charge-débit des principaux cours d'eau des États-Unis.

Les expérimentations de laboratoire ont vocation à affiner la modélisation de certains paramètres des relations d'équilibre des particules en suspension. Le dispositif est constitué d'une cuve de 300L équipée d'un disque rotatif positionné sur le fond pour contrôler les conditions d'érosion. La turbulence de la colonne d'eau est contrôlée par des agitateurs. Des particules sont injectées dans ce dispositif, l'évolution de la concentration est suivie par des turbidimètres et celle de la distribution granulométriques au moyen d'un granulomètre laser LISST-Portable XR.

Figure 1 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Pierre-Emmanuel OMS
Date du début de la thèse :	15 / 09 / 2015
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LRC
Tuteur de thèse :	Pascal BAILLY DU BOIS, IRSN / Pascal LAZURE et Franck Dumas, IFREMER
Directeur de thèse :	Pascal BAILLY DU BOIS, IRSN / Pascal LAZURE, IFREMER
Ecole doctorale :	Université de Bretagne Occidentale (UBO) Ecole Doctorale des Sciences de la Mer (EDSM)
Financement de thèse :	IRSN – IFREMER

Le transfert et la dispersion des radionucléides dans le milieu marin sont un axe essentiel à la maîtrise du risque nucléaire, dans le cas de rejets accidentels ou contrôlés. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de valider un modèle rendant compte de la dispersion de radionucléides dissous en mer.

Ce travail s'appuie conjointement sur la mesure du tritium (HTO) dans le golfe de Gascogne, utilisé comme traceur conservatif issu principalement des rejets des centrales nucléaires sur la Loire et la Gironde et sur la modélisation numérique en trois dimensions de ces processus de dispersion à l'échelle du golfe de Gascogne.

Les temps de résidence des eaux sur le plateau du golfe de Gascogne seront déterminés à l'aide de bilans quantitatifs entre les flux rejetés et les quantités mesurées *in situ*. Il sera également possible d'évaluer les contributions relatives des apports en tritium de la Loire et de la Gironde par l'utilisation conjointe des traceurs tritium et salinité. Un important effort d'échantillonnage et de mesure a été réalisé en étroite collaboration avec l'Ifremer et le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine). Trois campagnes océanographiques de prélèvements (450 échantillons) ont ainsi été réalisées dans le golfe de Gascogne entre mars et mai 2016.

Les concentrations en tritium dans le golfe de Gascogne sont à la limite des méthodes classiques de détection (1Bq/L) et sont parfois très proches du bruit de fond Atlantique ( $\approx 0,1$ Bq/L), ce qui nécessite l'utilisation de techniques de mesure à très bas niveau. Les premiers résultats, présentés fig.1, démontrent la capacité de ces techniques à identifier les zones de mélange. L'analyse des rapports tritium/salinité montre la signature caractéristique des émissaires de la Loire et de la Gironde.

En parallèle, l'élaboration et la mise en place de deux automates de prélèvement quotidien sur la Loire (Ponts-de-Cé) et la Gironde (Royan), ainsi que la modélisation des transferts des rejets des exploitants par le modèle CASTEAUR (IRSN), permettent d'établir le terme source en tritium nécessaire à la modélisation de la dispersion dans le golfe de Gascogne. Des premières simulations de la dispersion sont en cours avec le modèle MARS 3D (Ifremer).

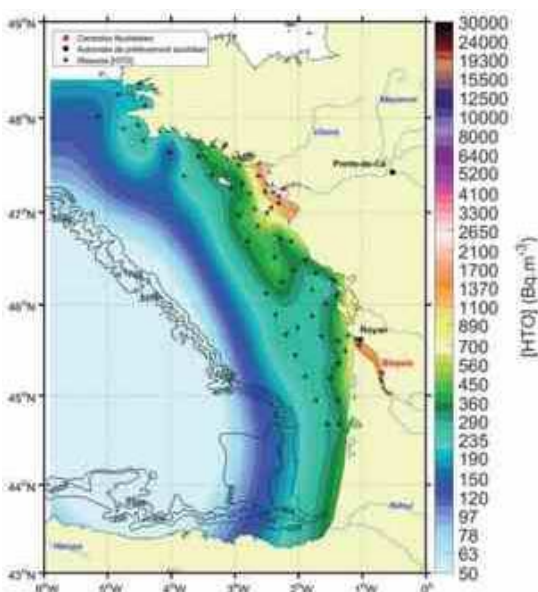


Figure 1: Concentrations en HTO ( $Bq.m^{-3}$ ) dans le golfe de Gascogne mesurées lors de la campagne PLUME (IRSN/Ifremer), du 20 au 29 mai 2016.

**Sujet de la thèse :****Comportement et devenir du tritium  
au sein des hydrosystèmes continentaux côtiers méditerranéens**

---

<b>Doctorant :</b>	Loïc DUCROS
<b>Date du début de la thèse :</b>	17 / 11 / 2014
<b>Laboratoire :</b>	PRP-ENV / SERIS / LRTE
<b>Tuteur de thèse :</b>	Frédérique EYROLLE-BOYER
<b>Directeur de thèse :</b>	Sabine CHARMASSON (IRSN)
<b>Ecole doctorale :</b>	Aix Marseille Université / ED251
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN / Région PACA

---

Présent naturellement dans les différents compartiments environnementaux de par ses sources cosmogéniques, le tritium ( $^3\text{H}$ ), radioisotope de l'hydrogène ( $T_{1/2} = 12,3$ ) fut massivement émis par les essais nucléaires de surface entre 1945 et 1980. Outre le fait qu'il soit considéré comme l'un des principaux radionucléides rejetés par l'industrie nucléaire française, le tritium est également produit dans d'autres domaines industriels (pharmaceutique, horloger ...).

Il est initialement présent dans l'environnement sous formes inorganiques gazeuse (HT) et liquide (HTO) et sous forme organique (Tritium Organiquement Lié (TOL)) suivant ainsi les cycles de l'eau et de la matière organique.

De récentes études ont mis en évidence le rôle du transfert différé de la matière organique marquée par les retombées des tests nucléaires, pour expliquer les déséquilibres observés entre les formes organiques et inorganiques, au sein de mêmes compartiments environnementaux. Afin de conforter l'hypothèse de rémanence et de transfert du tritium entre les compartiments environnementaux, la première partie de cette thèse a été centrée sur l'identification des zones préférentielles de dépôts des retombées des essais nucléaires, hors influence de rejets industriels contemporains, et sur l'analyse d'échantillons environnementaux (végétaux terrestres et aquatiques, sol, sédiments...). Des carottes sédimentaires ont été prélevées afin de reconstruire les chroniques de concentrations en  $^3\text{H}$ . De plus, l'analyse des teneurs en HTO dans des échantillons d'eau de surface, prélevés dans des zones non impactées, a permis d'établir des niveaux de références et d'identifier les paramètres explicatifs des variabilités spatio-temporelles observées.

Hors influence de rejets anthropiques contemporains, les faibles teneurs en tritium dans l'environnement engendrent des problèmes analytiques aujourd'hui identifiés. Afin de s'affranchir de ces contraintes, la seconde partie de la thèse s'est focalisée sur l'étude de la rémanence de  $^3\text{H}$  et des processus de transfert de la matière organique marquée sur un site atelier impacté par des rejets industriels (à proximité du centre CEA de Marcoule). Cette phase d'instrumentation associée à des campagnes d'échantillonnage terrestres et aquatiques a fourni des données dans le but de paramétrer un modèle de type fonction de transfert à l'échelle du bassin versant. *In fine*, cette étape permettra de valider les hypothèses émises quant à la rémanence et au transfert différé de la matière organique marquée vers les cours d'eau, tout en identifiant l'ensemble des processus concernés.

## Sujet de la thèse :

## Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium dans un écosystème prairial

Doctorant :	Hugo RENARD
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2014
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / LRC-LRTE
Tuteur de thèse :	Séverine LE DIZÈS-MAUREL
Directeur de thèse :	Olivier RADA KOVITCH - Cerege / Denis MARO - IRSN
Ecole doctorale :	ED251, Sciences de l'Environnement
Financement de thèse :	IRSN / EdF

Le tritium est rejeté dans l'environnement par les centrales nucléaires, les installations nucléaires de défense et les usines de retraitement des combustibles usés. Aucune technique de réduction des rejets de tritium n'est appliquée actuellement à une échelle industrielle. Les rejets tritiés par voie atmosphérique sont susceptibles d'atteindre des écosystèmes tels que la prairie, maillon essentiel de la chaîne alimentaire de l'homme par l'intermédiaire du bétail. Or des incertitudes persistent sur les transferts du tritium depuis l'atmosphère vers un écosystème prairial.

Dans ce contexte, il est nécessaire de quantifier précisément les transferts de tritium pour une meilleure évaluation de l'impact radiologique des rejets tritiés des installations nucléaires dans des situations chroniques ou accidentelles. A cet effet, l'IRSN développe le modèle TOCATTA-<sup>3</sup>H en collaboration avec EDF dans le cadre du projet VATO. Cet outil est dédié aux calculs des transferts de tritium au sein d'un écosystème prairial sur la base d'un pas de temps horaire.

Ce sujet de thèse s'intéresse aux incertitudes rémanentes dont trois points sont particulièrement étudiés en laboratoire : la discrimination isotopique du tritium dans l'herbe sous ambiance contrôlée (chambre de culture hydroponique), l'oxydation bactérienne du dihydrogène tritié dans les sols et l'incorporation du tritium dans les végétaux hors photosynthèse (i.e. la nuit).

La culture hydroponique d'herbe sous ambiance contrôlée (de 1 à 45 Bq.L<sup>-1</sup>), du stade de la germination de la graine au stade autotrophe, s'accompagne d'une étude des processus d'allocation et de translocation. Les résultats obtenus en culture hydroponique au niveau des feuilles, graines et racines confirment l'absence d'une discrimination isotopique du tritium dans la matière organique issue de processus photosynthétiques (facteur de discrimination isotopique de 1,00±0,15). Les expériences en laboratoire sur l'oxydation bactérienne du dihydrogène tritié (HT) en eau (HTO) dans le sol permettent d'implémenter un module d'oxydation bactérienne dans TOCATTA-<sup>3</sup>H. La figure 1 montre l'activité HTO issue de l'oxydation bactérienne dans un sol

limoneux, sous activité constante de HT. Les résultats en attente sur le processus d'incorporation nocturne de tritium devraient permettre de quantifier la cinétique nocturne de formation de matière organique tritiée.

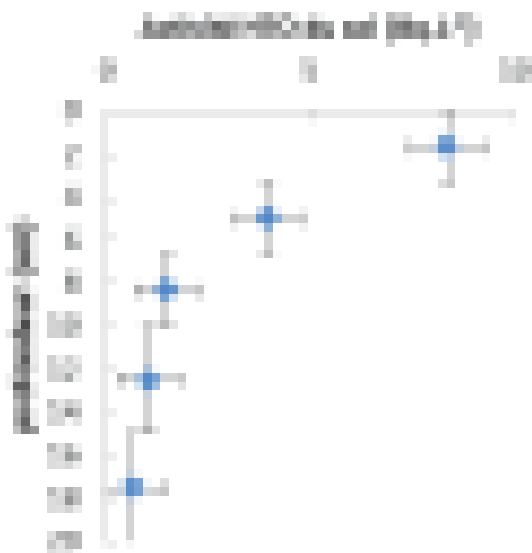


Figure 1: Activité en HTO produits par oxydation bactérienne dans un sol limoneux à partir d'une activité initiale en HT de 5 Bq.m<sup>-3</sup>, en fonction de la profondeur de sol. Les barres d'erreur horizontales correspondent à l'incertitude de mesure. Les barres d'erreur verticales représentent l'épaisseur des tranches de sol analysées.



➤ Vendredi 31 mars

11 h 20

Salle Bord de mer

## SESSION PLÉNIÈRE

### **Chimie des accidents**

**Présidente : Nathalie MONCOFFRE**

Directrice de recherche CNRS

Institut de physique nucléaire de Lyon

**Lola SARRASIN**, Mécanismes d'incorporation et de migration du Molybdène dans le dioxyde d'uranium stœchiométrique et sur-stœchiométrique.

**Dorel OBADA**, Évaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un Réacteur à Eau Pressurisée: étude expérimentale de la re-vaporisation de dépôts de produits de fission (Cs, I).

**Kasi GAJAVALLI**, Description thermodynamique des phases dans le ternaire Ag-In-Zr, en particulier à haute température, sur la base d'expériences.



## Sujet de la thèse :

**Mécanismes d'incorporation et de migration du Molybdène  
dans le dioxyde d'uranium stœchiométrique et sur-stœchiométrique**

Doctorant :	Lola SARRASIN
Date du début de la thèse :	07 / 11 / 2014
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LETR et Institut de physique nucléaire de Lyon
Tuteur de thèse :	Roland DUCHER
Directeur de thèse :	Nathalie MONCOFFRE - CNRS
Ecole doctorale :	Université Lyon 1 / ED Physique et d'Astrophysique (PHAST)
Financement de thèse :	IRSN

Ce travail se situe dans le cadre de la R&D sur l'amélioration de modèles prédictifs permettant l'évaluation des rejets de produits radioactifs lors d'un accident grave survenant sur un réacteur à eau sous pression (REP). Dans cette perspective, il faut évaluer le terme source, c'est-à-dire la nature, quantité et cinétique des produits de fission (PF) relâchés hors du combustible nucléaire. Le PF étudié ici est le molybdène, un élément clé de la chimie du combustible abondamment produit lors de la fission (6% des fissions de  $^{235}\text{U}$ ) et dont la mobilité est fortement liée à l'évolution du potentiel d'oxygène dans la matrice combustible. En situation accidentelle le molybdène peut également former de nouveaux composés avec d'autres PF (e.g. Cs, Ba) modifiant ainsi leurs comportements et le terme source (relâchement, volatilité...).

Les essais réalisés sur le comportement des PF (dont le Mo) dans l' $\text{UO}_2$  en conditions accidentelles ont été réalisés sur des échantillons de combustible irradié issus des essais VERCORS et Phébus PF dans des conditions non suffisamment maîtrisées pour permettre de comprendre finement les phénomènes physiques à l'origine de sa migration.

L'objectif majeur de cette thèse est de déterminer les coefficients de diffusion thermique et athermique du Mo dans  $\text{UO}_2$  et  $\text{UO}_{2+x}$  ( $x$  compris entre 0 et 0,1). Le Mo est introduit dans des échantillons d' $\text{UO}_2$  vierge (oxydés ou non) par implantation ionique. Les profils de concentration du Mo implanté sont ensuite suivis par technique SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), avant et après traitement des échantillons (effet d'irradiation, thermique), et les coefficients de diffusion apparents sont directement déduits de l'évolution de ces profils. Ces valeurs sont ensuite comparées aux simulations par calculs ab-initio.

Les résultats obtenus sur la migration du Mo dans  $\text{UO}_2$  à haute température (1600°C) et sous l'effet combiné de la température et de l'irradiation en régime électronique seront présentés. Nous montrons que seules les irradiations à fort pouvoir d'arrêt électronique (Se) ont entraîné un relâchement partiel du Mo, comme visible en Figure 1. La quantité de défauts électroniques (formation de traces) créés et leurs conséquences sur la microstructure de la matrice  $\text{UO}_2$  est donc le paramètre principal responsable de la migration du Mo, comme confirmé par les caractérisations par spectroscopie Raman.

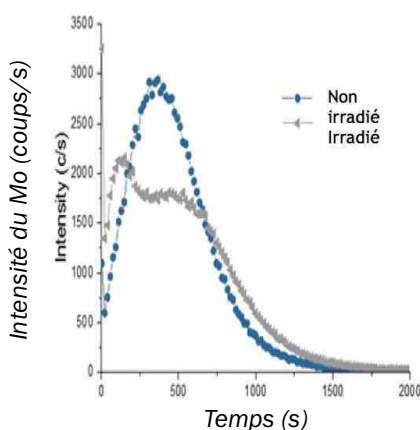


Figure 1: Chronogrammes SIMS du  $^{95}\text{Mo}$  dans un échantillon d' $\text{UO}_2$ . En gris : irradié avec des ions iode de 200 MeV ( $\text{Se} = 30 \text{ keV/nm}$ ) à  $1000^\circ\text{C}$  ; en bleu recuit à  $1000^\circ\text{C}$  sans irradiation.

## Sujet de la thèse :

Évaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un Réacteur à Eau Pressurisée: étude expérimentale de la re-vaporisation de dépôts de produits de fission (Cs, I)

Doctorant : Dorel OBADA  
 Date du début de la thèse : 01 / 11 / 2014  
 Laboratoire : PSN-RES / SEREX / L2EC  
 Tuteur de thèse : Anne-Cécile GRÉGOIRE  
 Directeur de thèse : Laurent GASNOT – Université Lille 1, PC2A UMR 8522  
 Anne-Sophie MAMEDE - ENSCLille, UCCS UMR 8181  
 Ecole doctorale : Université Lille 1 / Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement  
 Financement de thèse : ANR RSNR MiRE

Ce travail de doctorat s'inscrit dans une démarche d'amélioration des connaissances de l'IRSN sur le terme source à moyen-terme en cas d'accident grave d'un REP. L'étude se focalise sur le phénomène de re-vaporisation de dépôts de produits de fission contenant du césium et de l'iode depuis la surface du circuit primaire. Les travaux antérieurs à cette étude, de nature exclusivement qualitative, se sont principalement focalisés sur la re-vaporisation du césium à partir de dépôts de CsOH ou de CsI et ne permettent pas d'élaborer une modélisation. Ainsi aucune étude ne s'est intéressée à la forme chimique d'iode re-vaporisé. Les objectifs de ce travail sont donc (1) d'identifier les paramètres physicochimiques qui influencent le phénomène de re-vaporisation d'iodures métalliques, (2) d'établir la spéciation des espèces re-vaporisées, avec notamment un focus tout particulier sur les espèces iodées (3) de quantifier in fine les rejets moyen-terme en fonction des conditions opératoires.

Le travail expérimental engagé depuis un an s'est focalisé sur l'étude de la spéciation chimique des espèces iodées, re-vaporisées à partir de dépôts d'aérosols de CsI sur des surfaces représentatives du circuit primaire en cas d'accident grave (aciers 304L et 316L). A cette fin, un nouveau banc expérimental a été développé qui, une fois couplé à différentes techniques d'analyse appropriées, permet d'obtenir des informations sur la quantité d'iode moléculaire relâché, ainsi que sur la cinétique de son relâchement (Figure 1). Les résultats obtenus montrent l'importance de la composition de l'atmosphère sur la spéciation de l'iode re-vaporisé. Ainsi, sous air pur, l'iode est relâché majoritairement sous forme  $I_2$  (60-90%), alors que sous vapeur d'eau pure c'est l'espèce CsI qui est majoritaire. La re-vaporisation dans une atmosphère mixte air/vapeur d'eau a révélé la re-vaporisation d'iode partiellement sous forme  $I_2$  (20-30%). La quantité d'iode moléculaire ainsi re-vaporisée ne semble pas être influencée par le ratio air/vapeur d'eau dès lors qu'il y a présence d'air.

Un autre volet du travail expérimental a consisté à générer des dépôts de CsI par condensation de vapeurs (possible influence accrue de la réactivité de surface) à haute température ( $> 400^\circ\text{C}$ ), en vue d'étudier le comportement en re-vaporisation de ce type de dépôt. Plusieurs essais ont été réalisés et les analyses réalisées par MEB ont mis en évidence trois morphologies de dépôt en fonction de la température. Des premiers essais de re-vaporisation de ce type de dépôts ont été également réalisés.

En perspective court terme, une simulation de ces expériences avec le logiciel de calcul ASTEC est prévue.

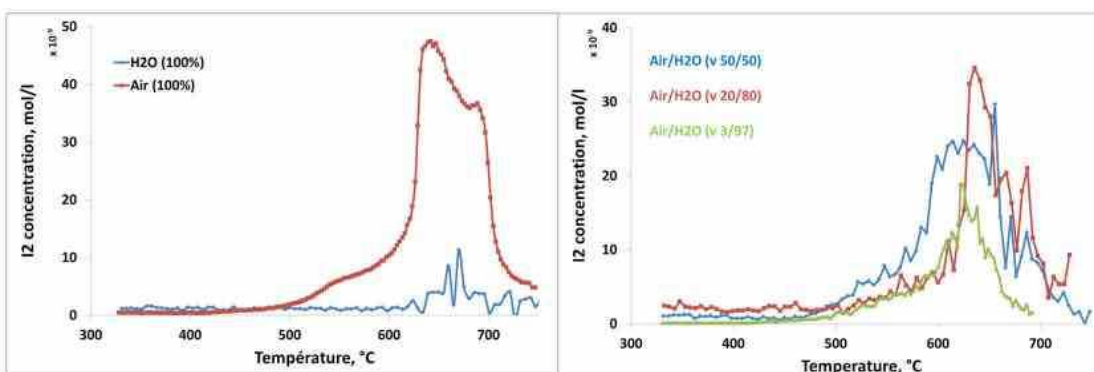


Figure 1.  
Cinétique de relâchement d'iode moléculaire suite à la re-vaporisation de CsI dans différentes conditions d'atmosphère.

**Sujet de la thèse :****Description thermodynamique des phases dans le ternaire Ag-In-Zr,  
en particulier à haute température, sur la base d'expériences**

<b>Doctorant :</b>	<b>Kasi GAJAVALLI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15 / 10 / 2015</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SAG / LETR</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Marc BARRACHIN &amp; Pierre BENIGNI (AMU)</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jacques ROGEZ – CNRS - Marseille</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Aix Marseille University / ED352</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

The 80 wt.% Ag, 15 wt.% In, 5 wt.% Cd (SIC) alloy is used in absorber control rods in most Pressurized Water Reactors (PWR). In case of Reactor Coolant System (RCS) failure, SIC control rods failure will occur above 1200°C leading to interactions with Zircaloy-4 guide tubes and to significant releases of Ag, In and Cd compounds in the RCS. Both aspects are related to important safety issues. Interaction with guide tubes will impact the fuel degradation and so the accident progression. Release kinetics of SIC compounds will directly impact the release of gaseous iodine that will lead to most of the accidental radiological consequences ( $I^{131}$  isotope). To be predictive in the description of these processes, thermodynamic properties are needed in the following systems : Ag-Cd-In and Ag-In-Zr ternary phase diagrams and some binary ones (Ag-Zr and In-Zr).

The literature review showed that the Ag-Cd-In ternary diagram remains largely unknown. Only two isopleth sections have been partly investigated. In this work, thermal analysis is performed for various compositions using a Differential Scanning Calorimeter (DSC) instrument to check and extend the limited existing data. Emphasis is put on the accurate determination of the liquidus temperatures of the alloys by interrupted Differential Thermal Analysis (DTA) heating i.e., temperature cycling experiments near the liquidus which are compared with the results obtained by the classical protocol at various heating and cooling rates and existing literature data points. The immediate perspective is to implement these new results into the NUCLEA database, developed by IRSN using the CALPHAD approach.

In parallel, the indium-zirconium binary system is investigated. Even if it is well-established that both elements can form various intermetallic compounds, the phase diagram remains largely unknown. The objective is to elaborate and subsequently measure the standard enthalpies of formation of the In-Zr compounds by dissolution calorimetry, a method to determine the heat of reaction when two different elements are mixed together in a temperature controlled environment. Serious concerns to reach the former objectives occurred due to the immiscibility of zirconium and indium at high temperature and other experimental difficulties associated with Zr and In chemistry. First calorimetry experiments were performed for Zr dissolution in Al, Sn and In. Some huge difficulties raised in dissolving Zr due to the slow dissolution kinetics of Zr which can be partly explained by low solubility in Al, Sn and In. The overall consistency of the new results with comparison to the literature data will be tested by means of a thermodynamic optimization approach using the CALPHAD method.

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

› Salle Largado

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

- **Ngoc Bao Tran LE**, Quantification d'incertitude par réduction de modèle de dispersion Atmosphérique.
- **Amine BEN DAOUED**, Démarche probabiliste pour la modélisation de l'aléa inondation avec prise en compte des incertitudes.
- **Thomas CHARTIER**, Modélisation de la sismicité sur les failles dans un calcul probabiliste de l'aléa sismique.
- **Jessica THOMAS**, Caractérisation de l'activité paléosismique des failles du Fossé rhéno-Saône Supérieur.
- **Ekoé KANGNI-FOLI**, Apport de matériaux cimentaires modèles à la description des cinétiques de carbonatation de bétons bas-pH : conséquences sur la microstructure, le transfert de gaz et les déformations.
- **Rémi GUÉDON**, Contribution des processus épigénétiques dans la sensibilité et l'héritabilité de la réponse du nématode *Caenorhabditis elegans* à une exposition chronique aux rayonnements ionisants.
- **Sophia MURAT EL HOUDIGUI**, Caractérisation de l'effet de l'exposition chronique à faibles doses de rayonnements ionisants sur les mécanismes épigénétiques et leurs conséquences sur le développement du système nerveux central.
- **Alexandre FLOURET**, Modélisation de la disponibilité du césium-137 aux interfaces sol-solution-plante. Amélioration des outils de prédiction.
- **Julie COLNOT**, Risque de complications associées à la radiothérapie externe : étude comparative des doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie externe.
- **Mariam BEN KACEM**, Utilisation de mesures d'Efficacité Biologique Relative moléculaires et fonctionnelles pour prédire le risque après radiothérapie - Application aux fortes doses par fraction et aux forts débits de dose.
- **Alice BONTEMPS**, Étude de la réponse adaptative au niveau rénal après exposition chronique à de faibles concentrations d'uranium : identification des voies de signalisation impliquées lors d'expositions *in vivo* ou *in vitro*.
- **Annaig BERTHO**, Lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique : modélisation préclinique et aspects radiopathologiques.
- **Manon JACQUEMIN**, Dosimétrie des isotopes émetteurs  $\beta^+$  pour l'optimisation des méthodes de suivi cellulaire *in vivo* par imagerie TEP.
- **Nicolas TANG**, Évaluation, à partir de modélisations nanodosimétriques, de l'influence de la compaction de la chromatine sur les effets radioinduits précoces et extension aux effets tardifs (dysfonctionnements et mort cellulaire).
- **Alexia LAPIERE**, Effet d'un traitement par des probiotiques (*Lactobacillus rhamnosus* et/ou *Faecalibacterium prausnitzii*) sur les atteintes du côlon et l'hypersensibilité viscérale radio-induite. Potentialisation de l'effet thérapeutique par les cellules stromales mésenchymateuses.
- **Stéphane GRISON**, Signatures moléculaires d'une contamination chronique par ingestion de faibles doses d'uranium sur un modèle d'exposition multigénérationnel.
- **Loïc MARTIN**, Devenir du radium et du thallium aux interfaces en contexte minier : implications sur les conséquences à long terme des rejets diffus.

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

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Ngoc Bao Tran LE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-CRI / SESUC / BMCA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Irène KORSAKISSOK</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Vivien MALLET - INRIA</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Ecole doctorale de Sciences Mathématiques de Paris-Centre</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Les modèles de dispersion atmosphérique à courte distance,  $pX$ , et à longue distance,  $ldX$ , sont développés au BMCA et intégrés dans la plateforme C3X, utilisée en crise pour évaluer les conséquences environnementales et sanitaires d'un rejet accidentel de radionucléides dans l'atmosphère. Les simulations contiennent des incertitudes dues aux modèles et aux données d'entrées (le terme source et les données météorologiques). Il est donc essentiel de comprendre, quantifier les incertitudes liées aux simulations et de développer des outils et des méthodes permettant de les prendre en compte dans les recommandations faites aux autorités lors de situation de crise nucléaire et ainsi mieux protéger la population.

Actuellement, les simulations sont réalisées de façon purement déterministe : les données d'entrée ainsi que la configuration du modèle sont choisies, et produisent un résultat unique. Les incertitudes peuvent être modélisées par un ensemble de simulations, obtenues en perturbant les paramètres incertains et en exploitant les prévisions d'ensemble météorologiques.

La première étape de la modélisation des incertitudes consiste à perturber les paramètres. Par exemple, pour un paramètre d'entrée qui suit la loi normale, une même valeur sera rajoutée sur tout le champ. Pour un paramètre de la loi log normale, une même valeur sera rajoutée sur tout le logarithme du champ. Pour la météo, un membre est tiré de façon aléatoire dans un ensemble météorologique. Une approche similaire peut être appliquée au rejet en utilisant un ensemble de termes sources issus de la littérature. Cela permet d'avoir un ensemble des entrées qui couvre assez largement ce domaine.

L'étape suivante est d'évaluer les sorties et effectuer les études de quantification d'incertitudes. Avec cet ensemble d'entrée, il est possible de calculer les variables de sortie et faire une comparaison aux observations. Deux questions se posent : Comment le résultat va-t-il répondre à un changement dans les variables d'entrée ? Comment peut-on qualifier la qualité de notre ensemble ? La comparaison de l'ensemble de simulations avec des observations permet d'évaluer la qualité de l'ensemble, *via* des outils tels que les diagrammes de rang.

Cette étude présente les simulations Monte Carlo sur le cas de l'accident de Fukushima. Elle reprend les travaux de Périllat et al. (2017). Les simulations de dispersion atmosphérique sont faites en utilisant la prévision d'ensemble météorologique du centre européen (CEP) et une prise en compte sommaire des incertitudes dues au modèle de dispersion et aux émissions. L'ensemble de simulations est comparé aux observations radiologiques d'activité volumique, de débit dose, et des mesures aéroportées de dépôt recueillies sur le Japon.

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

---

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

---

Le but de cette thèse est de développer et mettre en œuvre une approche probabiliste d'évaluation de l'aléa inondation externe (*Probabilistic Flood Hazard Assessment* ou PFHA).

Cette problématique est d'actualité pour la communauté scientifique dans les domaines du nucléaire et de l'urbain car il a été démontré que l'approche déterministe explorant un certain nombre de scénarios a certaines limites. Les approches probabilistes complètent les approches déterministes en explorant un ensemble de scénarios et en associant une probabilité à chacun d'eux. Ces approches probabilistes visent à identifier et à combiner tous les scénarios d'aléa possibles pour couvrir toutes les sources possibles de risque.

Le PFHA permet de caractériser une (des) quantité(s) d'intérêt (niveau d'eau, volume, durée, etc.) à différents points d'un site en se basant sur les distributions des différents phénomènes de l'aléa inondation ainsi que les caractéristiques du site.

Les principales étapes du PFHA sont: i) identification des phénomènes d'inondation possibles (pluies, niveau marin, vagues, etc.), ii) identification et probabilisation des paramètres associés aux phénomènes d'inondation sélectionnés, iii) propagation de ces phénomènes depuis les sources jusqu'aux points d'intérêt sur le site, iv) obtention de courbes d'aléa et agrégation des contributions des phénomènes d'inondation.

Les incertitudes sont un point important de la thèse dans la mesure où elles seront prises en compte dans toutes les étapes de l'approche probabiliste.

Dans le cadre de cette thèse, une première revue de la littérature a été réalisée tout en priorisant les points clés du sujet. Les premières réflexions portant sur certains aspects du sujet (dépendance et concomitance d'événements, modélisation des écoulements surfaciques, prise en compte des incertitudes, etc.) ont été développées et feront aussi l'objet de cette présentation.

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

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Thomas CHARTIER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>ENS &amp; PRP-DGE / SCAN / BERSSIN</b>
<b>Tuteur :</b>	<b>Oona SCOTTI</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Hélène LYON-CAEN / Ecole Normale Supérieure</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Paris VII - Sciences de la Terre, ED109</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancement AXA</b>

---

Taking faults into account in probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) often requires to simplify geological data and uncertainties. This study proposes a novel methodology to model faults that considers multiple fault rupture scenarios as an aleatory rather than an epistemic uncertainty while preserving the information attached to each fault. The methodology, conceived so as to be flexible and applicable to regions where data on faults, geodesy and seismicity may be sparse, is based on modelling seismicity rates using a geological slip rate budget approach. The advantage of this approach is that each fault consumes its own cumulated slip rate, alone or in combination with neighboring faults and depending on the fault-to-fault rupture scenario (FtF) considered but always in coherence with a regional target for the modeled magnitude frequency distribution (MFD). Depending on the rules set for the target, part of the geological fault slip rate may not contribute to the seismic hazard. This part of the geological slip rate (hereafter referred to as non-main shock slip -NMS) is then considered as after slip, distributed deformation, aftershock slip or aseismic slip. Modeled seismicity rates along each fault are then compared to data (earthquake catalogues, geodetic moment rate estimate, and paleoseismological records) in order to weight the different branches of the PSHA logic tree.

We test this methodology on the western Corinth Rift fault system, Greece, where a large number of active faults has been identified. It is shown that the methodology is very sensitive to the nature of FtF scenarios considered. In spite of the imposed Gutenberg-Richter shape for the regional MFD the resulting MFD of each individual fault varies, depending on the position of the fault in the system. Furthermore, the proportion of NMS can vary dramatically (from 30 to 80%) depending on the FtF ruptures allowed. Estimated geodetic moment rates, corrected for the modeled NMS, remain however still three times larger than either seismological or geological moment rates. Coherence between modeled geological  $M \geq 6.0$  earthquake rates and those deduced from paleoseismological and seismological data available for the Aigion fault, on the other hand, are encouraging and point to a mean of proposing relative weights between the different FtF rupture scenarios for a site-specific PSHA at Aigion.

**Sujet de la thèse :****Caractérisation de l'activité paléosismique des failles du Fossé rhénan Supérieur**

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Jessica THOMAS</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-DGE / SCAN / BERSSIN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Stéphane BAIZE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Prof. Klaus REICHERTER, RWTH Aachen</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université d'Aachen</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Co-financement IRSN / Université d'Aachen</b>

---

The Upper Rhine Graben (URG) is the central part of the Central European Rift System and one of the most seismically active regions in Western Europe, north of the Alps. This graben is delimited by faults, which are supposed to be active. The objective of the Thesis is the analysis of the fault system activity to figure out its seismotectonic parameters useful to estimate the associated seismic hazard. This is a challenging task because of the numerous critical facilities and highly populated cities. A first scientific challenge is the recognition and characterization of the fault activity in such a highly human-modified landscape and subject to erosional/depositional processes, both competing the growth of fault-controlled relief. To eventually determine the long-term deformation rate and the earthquake history, a key topic is the analysis of the sedimentary record along the faults which might have registered those deformation episodes.

The objectives during the first stages of the thesis, before investigating the sedimentary record, are 1) to analyze in detail the morphology with high-resolution Digital Elevation Models (DEM) and 2) to perform a detailed geophysical survey. The geomorphological analysis provides a first order fault location, its lateral extension and significance: interesting spots have already been found out and guided our first geophysical investigations. These consisted in Ground-Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) soundings which aim at imaging the sedimentary layers geometry and anomalies that could correspond to faults. Proven indicators for faults in GPR profiles are displacement of reflectors or changes in dip angle, reflection angle and pattern or signal intensity. The ERT proved very useful for the revision and verification of features found in GPR profiles. The GPR has limitations in case of high soil water content and there is a tradeoff between achievable spatial resolution and investigation depth. Several faults described in former studies (e.g. geological map of Baden-Württemberg, GeORG, 2012 and Nivière et al., 2008) could be verified, but partially with deviations in the exact location, possibly related to accuracy and density of the data sets, as well as the geophysical and interpolation methods that were employed. For defining an exact location for further trenches (planned for 2018), investigations with percussion drilling will be conducted to verify if the GPR and ERT anomalies are fault-related features rather than being caused by erosion.



## Sujet de la thèse :

**Apport de matériaux cimentaires modèles à la description des cinétiques  
de carbonatation de bétons bas-pH : conséquences sur la microstructure  
le transport de gaz et les déformations**

Doctorant :	Ekoé KANGNI-FOLI
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PRP-DGE / SRTG / LETIS
Tuteur de thèse :	Alexandre DAUZERES
Directeur de thèse :	Jean-Baptiste d'ESPINOSE - ESPCI PARIS
Ecole doctorale :	UPMC / ED 397
Financement de thèse :	Cofinancement IRSN / CEA

Le projet CIGÉO initié par l'Andra vise au stockage réversible des déchets radioactifs en site géologique. L'Andra envisage le stockage des déchets MAVL (Moyenne Activité-Vie Longue) dans des alvéoles souterrains scellés par un noyau d'argile gonflante en appui sur deux massifs en béton. L'utilisation de bétons classiques causant un panache alcalin conduirait à une inhibition potentielle des propriétés de gonflement du noyau d'argile. Les bétons bas-pH ont donc été développés en conséquence : ils sont obtenus par ajout massif de silice, les amenant ainsi à une valeur de pH deux à trois unités plus basse que les bétons classiques.

L'IRSN questionne la durabilité des éléments bas-pH, puisque les éléments de connaissance actuels tendent à montrer une sensibilité accrue de ces matériaux vis-à-vis de l'environnement de stockage et notamment de la carbonatation atmosphérique. Cette carbonatation serait induite par la réaction entre le CO<sub>2</sub> contenu dans l'air (utilisé pour ventiler les alvéoles durant leur phase d'exploitation) et le calcium contenu dans les différentes phases constitutives du matériau cimentaire. Des études montrent une augmentation des propriétés de perméabilité suite à la carbonatation des éléments bas-pH corrélée à une plus grande distribution des tailles de pores et une fissuration plus importante au sein des matériaux (Figure 1).

Cette thèse porte sur la compréhension du comportement des matériaux bas-pH face à la réaction de carbonatation. L'approche adoptée sera multi-échelles, nous aurons recours à l'étude de différents matériaux cimentaires avec une complexité minéralogique croissante. Celle-ci allant de matériaux modèles uniquement constitués de C-S-H (Silicate de Calcium hydraté) brique élémentaire des liants hydrauliques, aux matériaux industriels comprenant l'ensemble des phases propres aux matériaux cimentaires. La première partie de cette thèse, comprendra la synthèse, la carbonatation accélérée et la caractérisation fine sur le

plan chimique, minéralogique, et microstructurale des matériaux. La deuxième étape, correspondra à un post traitement numérique des résultats expérimentaux, via le code couplé chimie-transport HYTEC, permettant l'évaluation des cinétiques chimiques par analyse inverse.

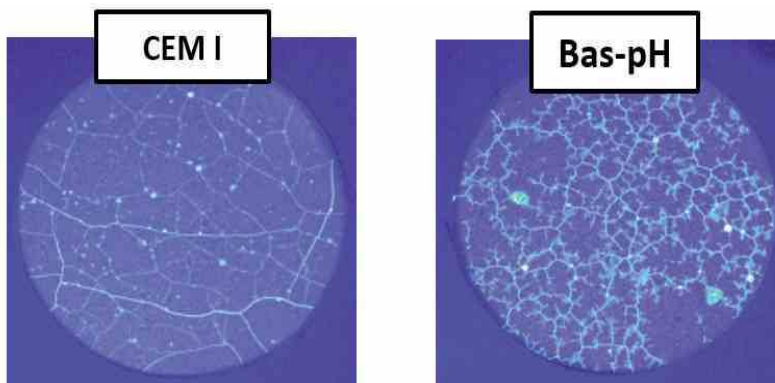


Figure 1 : Pâtes de ciments imprégnées de résine fluorescente, comparaison de la fissuration induite par la carbonatation dans un ciment bas-pH et dans un ciment classique.

Auoy et al. (2015) Cem. Concr. Res. 74, 44-58

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Rémi GUÉDON</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>13 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV / SERIS / LECO</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Catherine LECOMTE-PRADINES</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Simon GALAS – IBMM, CNRS / Catherine LECOMTE-PRADINES - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Science de l'environnement -AMU</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Les espèces vivantes sont continuellement exposées aux rayonnements ionisants issus de phénomènes naturels et des activités anthropiques. Certaines études indiquent que les effets biologiques induits par une exposition chronique à un stresser peuvent être transmis d'une génération à l'autre. Les travaux réalisés dans notre laboratoire sur *C.elegans*, ont montré qu'une exposition multigénérationnelle aux rayonnements gamma provoque une diminution de la reproduction, fonction biologique essentielle au maintien des populations et que cet effet persiste chez les descendants non exposés. Cette transmission de phénotype peut être due à des changements génétiques (atteintes du génome) ou épigénétiques (changements héréditaires et réversibles dans la régulation de l'expression des gènes, sans modifications de la séquence d'ADN).

Cette thèse a pour objectif de définir (1) les mécanismes moléculaires responsables de la diminution de reproduction en irradiation chronique, (2) l'implication des mécanismes épigénétiques dans la transmission d'informations transgénérationnelle.

Quatre générations de *C.elegans* ont été continuellement exposées, du stade œuf à jeune adulte, à une dose de 50mGy/h. Cette étude montre une diminution moyenne de la reproduction de 37%, associée à une augmentation significative de l'expression du gène pré-apoptotique *elg-1*, des dommages et de la réparation des cassures doubles brins de l'ADN. Les trois générations non exposées issues de parents irradiés présentent une diminution de la reproduction de 25%.

La dérégulation de gènes impliqués dans le stress oxydatif et la spermatogenèse, sur les générations continuellement exposées et après arrêt de l'irradiation, laissent entrevoir que des processus épigénétiques peuvent être impliqués dans la transmission du phénotype. Les principales modifications épigénétiques sont : la méthylation de l'ADN en 6mA, les modifications post-traductionnelles des histones et la contribution des ARNs non codants.

L'utilisation de souches mutantes, privées respectivement d'une enzyme impliquée dans la méthylation de l'ADN et la modification des histones, permet de réduire les effets de l'irradiation sur la reproduction des organismes continuellement exposés ou placés en condition contrôle après exposition parentale. Les processus épigénétiques ciblés semblent donc être impliqués dans la transmission d'informations transgénérationnelle.

Pour confirmer cette hypothèse, une approche de criblage haut débit est amorcée. Dans ce cadre, nous avons commencé une analyse d'acides ribonucléiques microRNAs et du transcriptome. Nous envisageons de quantifier les modifications post-traductionnelles de certaines histones ainsi que la méthylation du génome.

La finalité de cette approche est de caractériser les modifications génétiques et épigénétiques, leur implication dans la régulation du transcriptome et la réponse au stress, dans le but d'identifier une signature moléculaire de l'irradiation chronique.

**Sujet de la thèse :****Caractérisation de l'effet de l'exposition chronique à faibles doses  
de rayonnements ionisants sur les mécanismes épigénétiques et leurs conséquences  
sur le développement du système nerveux central**

---

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

---

Du fait des accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima et de l'utilisation croissante des radionucléides, la radioprotection de l'environnement constitue une source de préoccupation majeure. Une meilleure connaissance des effets d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants (RI) sur les organismes est nécessaire afin d'améliorer les outils d'évaluation des risques et de protéger les écosystèmes.

Les RI impactent directement l'intégrité des génomes en augmentant le stress oxydatif des cellules et en produisant des cassures d'ADN double brin à l'origine de mutations génétiques et de réarrangements chromosomiques. Cependant, la corrélation établie entre l'accumulation de mutations et la dose de RI n'explique qu'en partie les effets observés. En effet, les RI induisent également des modifications épigénétiques, changements dans l'expression des gènes sans modification de la séquence d'ADN et transmissibles à la descendance. Des études récentes ont montré une hyperméthylation des promoteurs de gènes impliqués dans la réparation de l'ADN, du cycle cellulaire et de l'apoptose chez des souris exposées aux RI à 50mGy/j. Ces résultats suggèrent que les modifications épigénétiques pourraient être utilisées comme biomarqueurs d'altérations radio-induites. Les marques épigénétiques contrôlent également les processus de développement embryonnaire et de différenciation cellulaire, en (dés)activant l'expression de certains gènes. Par conséquent, on se concentrera sur les stades précoces du développement, particulièrement au niveau du système nerveux central, reconnu comme étant très sensible aux stressseurs.

Dans ce cadre général, sachant que la neurogénèse est partiellement contrôlée par des facteurs épigénétiques, l'objectif de cette thèse est d'évaluer les effets d'une exposition chronique aux RI sur les mécanismes épigénétiques et génétiques et leurs conséquences sur le développement du système nerveux central au cours des étapes de développement précoce du poisson zèbre (*Danio rerio*), caractérisées comme les plus sensibles aux stressseurs. Ce modèle, fréquemment utilisé en toxicologie, présente de nombreux avantages comme des embryons transparents, abondants et facilement accessibles ainsi qu'un génome entièrement séquencé. Des œufs fertilisés seront exposés ou non (témoins) dans le dispositif MICADO Lab à 5 débits de doses (5µGy/h, 50µGy/h, 0,5mGy/h, 5mGy/h et 50mGy/h) du stade 4-8 cellules jusqu'au stade larvaire (96 heures post-fécondation), cette gamme de débits de dose englobant la valeur de protection des écosystèmes aquatiques (10µGy/h). L'impact des RI sur le développement embryonnaire sera évalué en réalisant une analyse morphologique (taille, malformation) et la mesure de marqueurs physiologiques (vitesse d'éclosion, fréquence cardiaque). Enfin, des analyses de biologie des systèmes seront réalisées afin d'étudier la méthylation de l'ADN et l'expression des gènes.

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

Doctorant :	Alexandre FLOURET
Date du début de la thèse :	07 / 11 / 2016
Laboratoire :	PRP-ENV / SERIS / L2BT
Tuteur de thèse :	Laureline FÉVRIER
Directeur de thèse :	François LAFOLIE - UMR EMMAH - INRA Avignon
Ecole doctorale :	Aix-Marseille / Sciences de l'Environnement (ED251)
Financement de thèse :	IRSN / Région PACA

---

De par ses propriétés de rétention et d'accumulation, le sol peut être à l'origine de transferts de contaminants vers les compartiments de la chaîne trophique, entraînant *in fine* un risque potentiel pour la population. Dans un tel cas, il est indispensable de pouvoir prédire les transferts des contaminants depuis le sol jusqu'aux plantes.

Le césium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) est un radionucléide possédant une demi-vie de 30 ans, dont la présence dans les sols est liée aux retombées d'essais nucléaires atmosphériques ou aux rejets accidentels. De par ses propriétés chimiques, celui-ci est adsorbé dans les premiers centimètres du sol créant une contamination rémanente à l'interface sol-plante. Analogue du potassium, le  $^{137}\text{Cs}$  peut être transféré dans la plante via les transporteurs potassiques. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de développer un modèle générique, permettant de mieux prédire le transfert du  $^{137}\text{Cs}$  aux interfaces sol-solution-plante.

Dans un premier temps, il s'agira de tester l'applicabilité d'un modèle géochimique décrivant les processus de rétention du Cs sur les composants du sol, à un panel représentatif des sols agricoles français. Pour ce faire, des expérimentations de sorption en réacteur à flux seront effectuées, permettant de rendre compte des mécanismes et des cinétiques de sorption du  $^{137}\text{Cs}$  pour une grande diversité de sols.

Dans un deuxième temps, une étude en système hydroponique sera réalisée afin de caractériser la vitesse d'absorption du  $^{137}\text{Cs}$  par la plante. Différentes plantes seront utilisées afin de déterminer l'affinité du  $^{137}\text{Cs}$  pour différents taxons (ex. monocotylédone, dicotylédone).

Dans un troisième temps, des expériences permettant de caractériser le pool de  $^{137}\text{Cs}$  bio-disponible en fonction de la composition du sol (via le même panel de sols utilisés précédemment) seront réalisées via l'utilisation de deux techniques : le DGT (Diffusive Gradients in Thin film), qui est un système d'absorption passif permettant de caractériser la capacité du sol à réalimenter sa solution en  $^{137}\text{Cs}$  suite à sa déplétion ; le RHIZOtest qui est un système de culture de plantes simple permettant de maximiser les flux entre les racines (développées sous la forme d'un tapis dense) et une fine couche de sol homogène.

Après la modélisation des interfaces simples (sols/solutions, solutions/plantes) et la caractérisation des interactions sols-plantes (RHIZOtest), les données seront implémentées dans un modèle global représentant la dynamique du  $^{137}\text{Cs}$  entre le sol et la plante.

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

---

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

---

L'utilisation de la radiothérapie externe dans le traitement des cancers n'a cessé d'augmenter ces dernières années et elle intervient aujourd'hui dans plus de 50% des traitements. Les nouvelles techniques utilisées permettent une meilleure conformation à la tumeur grâce à de hauts gradients de dose générés par de multiples faisceaux fins et à l'aide d'un asservissement à la respiration du patient. Cependant, ce gain en précision se fait au prix de l'exposition d'un plus grand volume de tissus sains. Ces doses aux tissus sains, conjointement délivrées par un plus grand balayage des faisceaux et par les techniques d'imagerie embarquée, augmentent alors le risque encouru par le patient de développer des complications à court, moyen et long terme.

Cette thèse a pour but d'estimer les doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie externe. Ce travail va se concentrer dans un premier temps sur une étude des doses périphériques délivrées en stéréotaxie pulmonaire par l'accélérateur Cyberknife. L'évaluation sera d'abord menée par modélisation avec le code Monte Carlo Penelope à l'aide d'une géométrie de la tête de l'accélérateur réalisée précédemment au laboratoire. Dans un premier temps, des développements supplémentaires de ce modèle seront nécessaires pour permettre une détermination précise des doses hors champ puis après validation du modèle, celles-ci seront évaluées après implémentation de fantômes voxelisés réalistes. Dans un second temps, des outils dosimétriques basés sur les films radiochromiques (dosimétrie 2D) et les gels dosimétriques (dosimétrie 3D) seront mis au point puis validés afin de mesurer avec précision les doses délivrées par les techniques avancées de radiothérapie en dehors du volume cible dans des fantômes anthropomorphes. Les doses délivrées par les systèmes d'imagerie embarquées seront également évaluées. Cette étude s'effectuera en collaboration avec l'institut Curie.

Une étude bibliographique préliminaire a permis de souligner la diversité et la sévérité des complications à moyen et long terme associées à l'irradiation pulmonaire ainsi que les différents facteurs de risques. La grande majorité des paramètres notés sont d'ordre dosimétriques tels que le volume de tissu irradié et la dose reçue. Cependant, ces facteurs dosimétriques sont évalués à l'aide des systèmes de planification de traitement qui sont peu précis pour estimer les doses déposées à distance du champ. De plus, la localisation tumorale semble également être un important facteur de risque.

Enfin, une caractérisation approfondie d'un gel dosimétrique commercial est en cours afin d'évaluer sa sensibilité et sa précision qui pourraient justifier son utilisation dans ce travail.

**Sujet de la thèse :**

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Mariam BEN KACEM</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SRBE / L3R</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Vincent PAGET</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Fabien MILLIAT - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPMC/ED394, Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

La radiothérapie permet de traiter plus de la moitié des patients atteints de cancer. Elle consiste à délivrer des doses de rayonnements ionisants pour éliminer les cellules cancéreuses en limitant la dose reçue aux tissus sains. Aujourd'hui, bien que les appareils et pratiques en radiothérapie évoluent vers un meilleur ciblage de la tumeur, les connaissances des effets biologiques sur les tissus sains, en lien avec les nouvelles pratiques et techniques, sont très limitées (variation de l'énergie, du débit de dose et du fractionnement).

L'Efficacité Biologique Relative (EBR) est un concept d'iso-effet défini par le rapport de la dose d'un rayonnement de référence et de la dose d'un rayonnement étudié. Cette notion d'EBR est utilisée pour prédire les effets biologiques suite à diverses situations d'expositions et par extrapolation elle sert à prédire un risque. Historiquement, et encore aujourd'hui, l'EBR est essentiellement basée sur le test de survie clonogénique qui détermine la capacité d'une cellule à repartir en prolifération suite à un stress. La modélisation des courbes de survie aboutit au « modèle linéaire quadratique », actuellement utilisé pour la prédiction du risque. Ce modèle reste insuffisant à lui seul et inadapté pour des fortes doses par fraction (par exemple : stéréotaxie et hypofractionnement sévère).

Cette thèse a pour objectif de développer des mesures d'EBR multiparamétriques pour mieux prédire les effets biologiques et par extrapolation le risque de complications aux tissus sains. Le travail visera à acquérir des mesures biologiques en lien avec les protocoles de radiothérapie émergents (fortes doses par fraction et forts débits de dose). Une première partie *in vitro* consistera à acquérir, en plus du test de survie clonogénique, des mesures biologiques multiparamétriques (viabilité/mortalité cellulaire, sénescence, cycle cellulaire, paramètres inflammatoires et signature génique) à des temps précoces (J3), intermédiaires (J7) et tardifs (J21) sur des cellules endothéliales humaines. Les cellules seront irradiées (en faisant varier le débit de dose) avec un accélérateur linéaire médical (LINAC) avec des irradiations en dose unique et en dose fractionnée. Une deuxième partie sera consacrée à la modélisation de l'information biologique obtenue en collaboration avec des mathématiciens et biostatisticiens. Enfin, nous validerons *in vivo* dans un modèle préclinique la pertinence de cette modélisation via deux approches, d'une part, une irradiation en dose unique de l'anse intestinale extériorisée (permettant de vérifier l'impact du débit de dose) et d'autre part, une irradiation pulmonaire en condition stéréotaxique (pour vérifier l'impact du fractionnement de la dose).

## Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Alice BONTEMPS
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Yann GUÉGUEN
Directeur de thèse :	Olivier BARBIER – CINVESTAV (Mexique)
Ecole doctorale :	Paris-Sud 11 / ED569, Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué
Financement de thèse :	IRSN

L'uranium et le fluor sont deux substances néphrotoxiques d'origine naturelle ou anthropique, auxquelles l'Homme est exposé à faible dose. Bien que leurs effets néphrotoxiques à forte dose soient bien documentés, les risques sanitaires lors d'exposition chronique à faible dose et la forme de la courbe dose-réponse dans la gamme des faibles concentrations restent controversés. Des études récentes menées à l'IRSN et au CINVESTAV (Mexique) ont suggéré que les effets biologiques de l'uranium et du fluor au niveau rénal ne suivent pas une relation linéaire mais entraîneraient une réponse avec seuil de type adaptatif.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de mettre en évidence la réponse adaptative rénale suite à une exposition chronique à de faibles doses d'uranium ou de fluor, et d'en identifier les mécanismes moléculaires et voies de signalisation sous-jacents.

Pour atteindre cet objectif, deux modèles expérimentaux sont utilisés : la lignée cellulaire HK-2 issue de cellules rénales humaine et le modèle murin C57BL/6J contaminé par l'eau de boisson. Afin de mettre en évidence cette réponse adaptative et d'en étudier les mécanismes, un protocole d'exposition spécifique a été mis en place (Figure 1). Les deux modèles seront exposés de manière chronique à de faibles doses d'uranium ou de fluor que l'on appelle doses « prime » afin d'observer si cela confère un effet protecteur ou non vis-à-vis d'une dose « challenge » fortement concentrée.

- Pour étudier la mise en place de la réponse adaptative les effets phénotypiques délétères (mortalité cellulaire, dommages à l'ADN, fonctionnalité ...) induits par la dose challenge seule sont comparés avec ceux induits par la dose challenge précédée d'une exposition chronique à faibles doses.

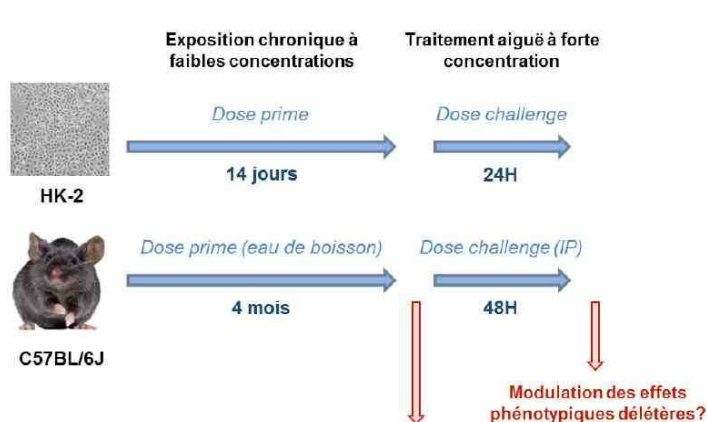


Figure 1 : Protocole expérimental permettant de mettre en évidence une réponse adaptative au niveau du système rénal.

- Les mécanismes cellulaires et tissulaires de la réponse adaptative seront étudiés via l'expression de gènes et de protéines, ainsi que l'activité d'enzymes spécifiques du statut redox, de l'inflammation, de l'autophagie ainsi que de la réparation de l'ADN. La vérification des voies de signalisation impliquées se fera par une approche d'inactivation de gènes (KO ou siRNA), ainsi que d'induction de facteur de transcription par des substances pharmacologiques.

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

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

Doctorant :	Annaïg BERTHO
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2016
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE/L3R
Tuteur de thèse :	Agnès FRANÇOIS
Directeur de thèse :	Agnès FRANÇOIS - IRSN
Ecole doctorale :	UMPC – Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutiques (P2T)
Financement de thèse :	IRSN

---

La radiothérapie stéréotaxique est une technique de pointe permettant l'irradiation de très petits volumes avec une précision millimétrique grâce à la convergence de mini-faisceaux au centre de la cible. La réduction du volume irradié permet l'utilisation de fortes doses par fraction allant de 6 à 20 Gy, on parle alors de doses ablatives. D'abord prescrite pour les tumeurs intracrâniennes, la radiothérapie stéréotaxique est maintenant utilisée pour traiter les tumeurs pulmonaires non à petites cellules, de stade précoce, comme alternative à la chirurgie.

Malgré la réduction du volume de tissu sain pulmonaire irradié, les patients développent des effets secondaires aigus comme des pneumopathies radiques ou tardifs comme des fibroses pulmonaires. Aujourd'hui, le manque de données radiobiologiques aux fortes doses par fraction reste une problématique. Le but est donc l'étude des conséquences radiobiologiques et radiopathologiques de l'irradiation stéréotaxique. *In vivo*, un modèle préclinique unique permet de recueillir des données radiopathologiques chez la souris et *in vitro*, la mesure des différents paramètres cellulaires permet d'identifier la réponse cellulaire aux fortes doses par fraction.

La modélisation préclinique de la radiothérapie stéréotaxique qui faisait jusqu'alors face à un verrou technologique, a pu être mise en place grâce à l'acquisition du SARRP par le SRBE. Le SARRP est un système de micro-irradiation guidée par l'imagerie et couplé à un logiciel de plan de traitement qui nous permettra de simuler la radiothérapie stéréotaxique chez la souris. Notre objectif est d'acquérir *in vivo* des données radiopathologiques originales, prenant en compte l'effet du volume irradié, de la dose totale délivrée ainsi que du fractionnement. Les 1<sup>ères</sup> irradiations réalisées permettront d'observer l'effet du volume irradié grâce à l'utilisation de 3 collimateurs différents : 10x10 mm<sup>2</sup>, 3x3 mm<sup>2</sup>, 1x1 mm<sup>2</sup>, pour une dose unique de 90 Gy, centrée sur le poumon gauche.

*In vitro*, afin de déterminer la réponse cellulaire aux fortes doses par fraction, les différentes lignées cellulaires pulmonaires : les pneumocytes 1, les cellules épithéliales bronchiques, les fibroblastes pulmonaires, les cellules musculaires lisses bronchiques et les cellules endothéliales microvasculaires, seront irradiées suivant différents protocoles de fractionnement et analysées 7 jours post-irradiation. L'expression génique et protéique ainsi que des mesures multiples, telles que l'apoptose, la sénescence, la progression dans le cycle cellulaire, permettront d'obtenir une cartographie de la réponse cellulaire.

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



**Sujet de la thèse :****Dosimétrie des isotopes émetteurs  $\beta^+$  pour l'optimisation des méthodes de suivi cellulaire *in vivo* par imagerie TEP**

<b>Doctorant :</b>	<b>Manon JACQUEMIN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM / SDI / LEDI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Nora HOCINE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Didier FRANCK - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université paris Sud / PHENIICS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

L'imagerie par tomographie d'émission de positons (TEP) pourrait être une modalité prometteuse pour suivre le trafic de cellules de sang radiomarquées *in vivo* en diagnostic clinique ou dans le cadre d'une thérapie cellulaire.

Toutefois, cette technique présente des limites liées au radiomarquage des cellules telles que l'instabilité des marquages et surtout le risque de perte de fonctionnalité des cellules. Ces importants écueils conduisent aujourd'hui à s'intéresser à l'évaluation de la dosimétrie à l'échelle cellulaire des radioisotopes utilisés en imagerie TEP, nécessaire si l'on souhaite ensuite améliorer le suivi du trafic cellulaire.

Ce travail préliminaire a consisté à réaliser une étude dosimétrique à l'échelle cellulaire et subcellulaire à l'aide de simulations Monte-Carlo, à partir d'un modèle de géométrie simple, pour 3 radioisotopes utilisés en imagerie TEP : F-18, Cu-64, Ga-68 en comparaison à 2 radioisotopes utilisés classiquement en SPECT (tomographie par émission monophotonique) : le Tc-99m et l'In-111.

Le calcul de facteurs S (dose absorbée par unité d'activité cumulée) a été réalisé en utilisant le code Monte-Carlo MCNPX. Une répartition uniforme des radioisotopes: Tc-99m, In-111, F-18 et Ga-68 dans le cytoplasme et du Cu-64 dans le noyau a été considérée.

Dans un premier temps, une validation des calculs dosimétriques avec le code MCNPX a été réalisée par comparaison des facteurs S calculés avec les valeurs du MIRD et celles publiées dans la littérature.

Dans un second temps, les facteurs S calculés pour les candidats radioisotopes étudiés ont été comparés afin de déterminer le moins toxique.

Les résultats des calculs Monte-Carlo pour 2 radionucléides: Tc-99m, In-111 ont montré que la différence relative était respectivement de 7% et -10.2% par rapport aux valeurs du MIRD et de 4.1% et 0.7% en moyenne par rapport à la littérature.

Dans le cas d'une cellule isolée et pour les 5 radioisotopes : Tc-99m, In-111, F-18, Cu-64 et Ga-68, les résultats ont montré que le Tc-99m présentait les valeurs de facteur S les plus faibles tandis que le Cu-64 présente les valeurs de facteurs S les plus élevées. Les résultats des calculs ont révélé que le Ga-68 serait le moins radiotoxique des candidats radioisotopes potentiellement utilisables en TEP et étudiés ici.

Le bon accord constaté entre les calculs de facteurs S, les valeurs du MIRD et la littérature a permis de valider le code MCNPX pour le modèle sphérique utilisé.

Les premiers résultats suggèrent que le Ga-68 pourrait être un radioisotope de choix pour l'imagerie cellulaire *in vivo* en phase précoce.

**Sujet de la thèse :**

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

**Doctorant :** Nicolas TANG  
**Date du début de la thèse :** 03 / 10 / 2016  
**Laboratoire :** PRP-HOM / SDE / LDRI  
**Tuteur de thèse :** Carmen VILLAGRASA  
**Directeur de thèse :** Sébastien INCERTI, IN2P3 - CENBG  
**Ecole doctorale :** Université de Bordeaux – Sciences Physiques et de l'Ingénieur – ED 209  
**Financement de thèse :** IRSN

---

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

Partant de cela, cette thèse a pour premier objectif d'étudier, en utilisant la simulation Monte Carlo, l'influence des deux niveaux de compaction de la chromatine qui sont l'hétérochromatine (forme condensée) et l'euchromatine (forme décondensée) sur les dommages biologiques. Il est nécessaire de calculer les cassures double brins (CDB) à l'ADN dans un modèle géométrique réaliste comprenant les deux compactations de la chromatine. Un modèle d'hétérochromatine a été conçu précédemment au laboratoire et dans ce travail devra être implémentée sa coexistence avec un nouveau modèle d'euchromatine. Cette géométrie de l'ADN est générée grâce à un logiciel qui a été récemment développé au sein du laboratoire : DnaFabric. Des données expérimentales concernant la répartition de la chromatine proviendront du Laboratoire de Dosimétrie Biologique (LDB) de l'IRSN. Ainsi, des nouveaux noyaux cellulaires plus réalistes comprenant une répartition des zones d'hétérochromatine et d'euchromatine pourront être générés et exportés vers une chaîne de calcul basée sur le code Monte Carlo Geant4-DNA pour y effectuer les différentes simulations. En effet, le calcul des CDB est réalisé à l'aide de cette chaîne permettant de simuler les différentes étapes suivant l'irradiation (physique, physico-chimique et chimique). Il reste à améliorer l'étape chimique pour mieux prendre en compte les dommages aux bases. Il est également prévu d'étendre la simulation au calcul des aberrations chromosomiques en étudiant la complexité et la répartition spatiale dans chaque chromosome des CDB et d'y implémenter des lois de probabilité afin de calculer le taux de mauvaises unions menant aux aberrations chromosomiques.

Actuellement, la prise en main de Geant4-DNA et de DnaFabric a déjà été effectuée. Plusieurs calculs ont été réalisés avec des modifications de l'étape chimique qui restent à consolider. Un nouveau modèle de noyau cellulaire CHO a été généré intégrant un premier modèle d'euchromatine à améliorer.

**Sujet de la thèse :**

**Effet d'un traitement par des probiotiques  
(*Lactobacillus rhamnosus* et/ou *Faecalibacterium prausnitzii*) sur les atteintes du côlon  
et l'hypersensibilité viscérale radio-induite. Potentialisation de l'effet thérapeutique  
par les cellules stromales mésenchymateuses**

**Doctorant :** Alexia LAPIERE  
**Date du début de la thèse :** 02 / 11 / 2016  
**Laboratoire :** PRP-HOM / SRBE / LR2I  
**Tuteur de thèse :** Alexandra SÉMONT  
**Directeur de thèse :** Marc BENDERRITER – IRSN / Jean-Marc CHATEL - INRA  
**Ecole doctorale :** UPMC – ED 394, Physiologie, physiopathologie et thérapeutique  
**Financement de thèse :** IRSN

---

La radiothérapie est l'un des traitements les plus utilisés pour soigner une grande variété de cancers de la zone pelvienne. L'irradiation des tissus situés autour de la tumeur entraîne des effets secondaires plusieurs années après la fin de la radiothérapie. L'apparition tardive de symptômes spécifiques a donné lieu en 2010 à la définition d'une nouvelle pathologie, la « *Pelvic Radiation Disease* ». Parmi les différents symptômes, les dysfonctionnements du tractus digestif altèrent considérablement la qualité de vie des patients. Ils ont pour origine le déclenchement d'une forte réponse inflammatoire suite à la perte de l'intégrité d'organes fortement radiosensibles comme le côlon et le rectum. Plus récemment, il a été démontré une modification de la diversité du microbiote intestinal après radiothérapie, avec en particulier une diminution des populations de *Faecalibacterium prausnitzii* (Fp). Dans des conditions physiologiques, Fp joue un rôle important dans le maintien de la barrière intestinale. Au sein du LR2I, un effet thérapeutique des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) a été démontré dans un modèle animal d'ulcération radio-induite du côlon. Cet effet bénéfique reste cependant partiel. Cette étude s'inscrit dans la potentialisation de cette thérapie cellulaire, en associant aux CSM une administration de Fp. Le premier objectif de cette thèse a été de démontrer l'effet radio-protecteur de Fp.

Dans ce but, nous avons étudié 72 h après une irradiation colorectale de 29 Gy, l'effet de l'administration quotidienne de  $10^9$  CFU de Fp. Le traitement commence 3 jours avant l'irradiation et se poursuit jusqu'à la veille de l'euthanasie des animaux. L'intégrité de la barrière colique a été évaluée par deux approches complémentaires,

1. Une analyse des altérations histologiques et de l'état de renouvellement de l'épithélium colique (coloration HES et immuno-marquages des cellules épithéliales proliférantes),
2. Une analyse *ex vivo* en chambre d'Ussing de la perméabilité colique par l'évaluation du passage de dextran (PM : 4 kDA) au travers de la muqueuse.

Nos résultats semblent montrer que l'administration journalière de Fp diminue les dommages radio-induits de la muqueuse colique. Ce traitement réduit les zones de cryptes atypiques et/ou ulcérées. Cet effet est associé à une capacité proliférative accrue des cellules épithéliales. Enfin, la perméabilité colique augmentée après irradiation retourne à des niveaux contrôlés après le traitement par Fp.

Ces résultats préliminaires suggèrent que l'administration de Fp aurait une action radio-protectrice sur les dommages de l'épithélium colique et sur sa fonction de barrière. Ces résultats devront être reproduits pour être confirmés.

## Sujet de la thèse :

## Signatures moléculaires d'une contamination chronique par ingestion de faibles doses d'uranium sur un modèle d'exposition multigénérationnel

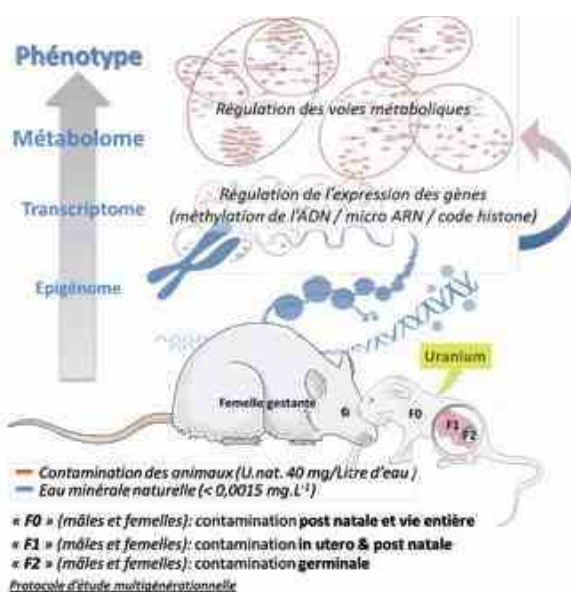
Doctorant :	Stéphane GRISON
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2015
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE / LRTOX
Tuteur de thèse :	Maâmar SOUIDI
Directeur de thèse :	Maâmar SOUIDI – IRSN / Jean-Marc LOBACCARO - Clermont Université
Ecole doctorale :	Clermont Université / Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement
Financement de thèse :	IRSN

Le risque associé aux expositions chroniques à de faibles doses de radionucléides est un questionnement scientifique et sociétal d'actualité. Parmi l'ensemble des radionucléides, l'exploitation industrielle de l'uranium (élément tellurique connu pour sa radiotoxicité et sa chimiotoxicité) est susceptible d'exposer le public, les travailleurs et leurs descendances. Des études expérimentales récentes, avaient montré chez le rat contaminé à faible dose d'uranium, l'existence d'effets géniques, protéiques et métaboliques dans divers systèmes physiologiques. Or, l'hétérogénéité des populations concernées nécessite aussi, de s'intéresser au dimorphisme sexuel, aux périodes les plus critiques du développement des individus et de mener des études sur plusieurs générations. A partir d'un protocole de contamination multigénérationnelle de rats, réalisé sur trois générations, différentes périodes du développement des individus ont été directement exposées (juvénile-F0, fœtale-F1 et germinale-F2). L'objectif de cette étude consiste à identifier les principaux systèmes biologiques impactés. A ce titre, l'attention portera principalement sur le rein, organe cible de l'uranium. Des techniques d'analyses « omiques » seront utilisées pour fournir des signatures moléculaires exhaustives et descriptives des effets métaboliques de telles expositions.

Nos premiers résultats montrent l'existence d'un effet multigénérationnel dénué d'atteinte clinique (survie, prise pondérale, alimentaire et hydrique). Des variations significatives mesurées sur certains paramètres biochimiques cliniques (urinaires et sanguins) sont constatées pour les générations F1 et F2. L'analyse du métabolome et du transcriptome rénal

montre aussi des effets sur plusieurs générations (F0, F1) portant principalement sur la voie métabolique du nicotinate/nicotinamide. A ceux-ci sont associés des modifications épigénétiques de l'expression de certains micro-ARNs (F0) et du taux de méthylation globale de l'ADN (F1, F2).

En conclusion, ces premiers résultats confirment l'existence d'effets multigénérationnels moléculaires dépendant du genre des individus. En perspective, ces résultats seront complétés pour l'ensemble des trois générations étudiées mais aussi sur un plan mécanistique, il s'agira d'approfondir l'hypothèse d'une atteinte moléculaire de la fonction de filtration tubulaire au niveau des transporteurs cationiques par exposition chronique faible dose d'uranium.



**Sujet de la thèse :**

**Devenir du radium et du thallium aux interfaces en contexte minier :  
implications sur les conséquences à long terme des rejets diffus**

**Doctorant :** Loïc MARTIN  
**Date du début de la thèse :** 15 / 10 / 2014  
**Laboratoire :** IPGP / EGE & PRP-DGE / SRTG / LT2S  
**Tuteur de thèse :** Caroline SIMONUCCI  
**Directeur de thèse :** Marc BENEDETTI / Institut de Physique du Globe de Paris  
**Ecole doctorale :** Paris VII - Institut de Physique du Globe (IPGP)  
Sciences de la Terre, ED109  
**Financement de thèse :** IPGP (Paris 6)

---

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

› Salle Largado

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

- **Mathias ROGER**, Analyse sociologique de la gouvernance des risques : le cas des Evaluations Complémentaires de Sûreté suite à l'accident de Fukushima.
- **Manon BRITEL**, Analyse psychosociale de la radioprotection dans le domaine médical : perspectives pour l'IRSN.
- **Shi JIANWEI**, Influence de la porosité sur les transferts thermiques au sein des chemins de câbles.
- **Thomas JAILIN**, Étude expérimentale et modélisation du comportement d'un tube de gainage lors d'un accident de réactivité en phase post-crise d'ébullition.
- **Shambhavi NANDAN**, Modélisation d'évolutions de configurations du corium en fond de cuve en cas d'accident grave.
- **Alejandro VILLARREAL LARRAURI**, Modélisation et analyse des processus de refroidissement sous eau des bains de corium en interaction avec le béton.
- **Benjamin BLAISOT**, Étude de la mobilisation d'aérosols par flashage de jet liquide : application à la problématique des poussières au cours d'une perte de vide par entrée d'eau dans ITER.
- **Florian OUVRIER- BUFFET**, Développement et qualification de méthodes non-destructives ultrasonores pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton.
- **Alexis DÉPÉE**, Étude microphysique du lessivage des particules radioactives par les nuages : influence de la charge électrique des aérosols.
- **Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG**, Modélisation micro-mécanique de l'endommagement ductile par une approche cohésive volumique : application à l'UO<sub>2</sub> irradié.
- **Adrien SOCIÉ**, Modélisation thermo-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires.
- **Zhenhai ZOU**, Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé.
- **Léa TILLARD**, Étude de l'impact des options de gestion du plutonium et des actinides mineurs dans une phase de sortie du nucléaire.

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

---

<b>Doctorant :</b>	<b>Mathias ROGER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>29 / 07 / 1990</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SFOHREX / LSHS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christine FASSERT</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Soraya BOUDIA CERMES3</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris V – ED SHS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>ANR – RSNR Agoras / IRSN</b>

---

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

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

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

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

<b>Doctorante :</b>	<b>Manon BRITEL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>10 /10/ 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-SRDS / SFOHREX / LSHS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Michel BOURGUIGNON - IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Marie PRÉAU (Groupe de recherche en psychologie sociale, Université Lyon 2) et Michel BOURGUIGNON</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Lyon - Education Psychologie Information et Communication EPIC - ED485</b>
<b>Financement :</b>	<b>IRSN</b>

---

**Contexte :** L'exposition aux rayonnements ionisants (RI) dans le domaine médical représente la plus importante exposition intentionnelle. De plus, ce type d'exposition est en croissance notable avec l'augmentation des actes d'imagerie et de la dose collective (rapport IRSN-PRP-HOM n°2014-6). A travers les divers types d'imagerie, et notamment à travers les mammographies, la population générale est exposée aux RI. Cependant, le grand public n'a pas de notion claire de cette exposition : l'information au sujet des risques encourus n'est pas évidente et la dose totale reçue par le patient n'est pas calculée. C'est donc pour répondre à ce besoin de clarification, d'information, de communication et de formation que l'IRSN met en place un site internet dédié : La radioprotection en question.

Cependant, communiqué autour des risques et des avantages des RI dans le domaine médical auprès du grand public revient à se confronter aux croyances, représentations et peurs qui gravitent autour de l'idée de nucléaire. Afin de faciliter la compréhension et d'orienter les comportements dans le sens de la prévention promu par l'IRSN, il est nécessaire d'étudier à travers une étude psychosociale les représentations sociales du nucléaire dans le domaine médical. Pour ce faire nous utiliserons l'exemple du dépistage du cancer du sein. Cette étude s'appuie notamment sur la théorie des représentations sociales et sur les études portant sur les comportements de santé et de prévention.

**Méthodes :** Pour répondre à cette demande plusieurs recueils de données seront mis en place.

- Un recueil de données quantitatif auprès du grand public sous forme de questionnaire. Cette méthode a pour objectif de mettre en évidence des éléments de la représentation sociale du nucléaire en général et des RI dans le domaine médical.
- Un recueil de données quantitatif auprès des femmes concernées par le dépistage organisé du cancer du sein, ainsi qu'auprès de celles concernées par le dépistage individuel. L'objectif est d'investiguer les représentations du dépistage et des rayonnements ionisants dans ce dépistage.
- Un recueil de données auprès des professionnels concernés : les gynécologues et les généralistes parce qu'ils prescrivent ou invitent les femmes à réaliser une mammographie ; les radiologues et les manipulateurs parce qu'ils sont directement concernés par cet acte. Ce recueil vise à comprendre ce que pensent ces professionnels du dépistage et comment l'information circule entre eux et les femmes qui les consultent.
- Une analyse du discours médiatique grand public, professionnel et institutionnel sera également réalisée. L'objectif est d'étudier le contenu de l'information aux différents niveaux concernés.

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



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

<b>Doctorant :</b>	<b>Jianwei SHI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SA2I / LIE</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Germain BOYER</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean François THOVERT - Pprime</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de Poitiers / Pprime</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Les installations nucléaires contiennent une importante masse de câbles, assemblés sous forme de faisceaux ou de chemins, qui sont susceptibles de subir une dégradation thermique en cas de départ de feu et donc de dégager de grandes quantités d'espèces volatiles inflammables. Pour caractériser les incendies impliquant des câbles, l'IRSN s'intéresse notamment à des configurations idéalisées à plusieurs chemins de câbles horizontaux superposés pour comprendre les mécanismes de propagation du feu horizontale (le long d'un chemin) et verticale (d'un chemin à l'autre). Dans ce contexte, la thèse vise à évaluer la capacité d'outils numériques s'appuyant sur une modélisation fine de la pyrolyse, à simuler les transferts thermiques en milieux poreux et à évaluer les temps de propagation verticale sur les chemins de câbles.

Dans ce contexte, la thèse présente deux volets visant à améliorer ces modélisations. D'une part, nous nous intéressons aux transferts thermiques au sein même des matériaux qui constituent les câbles. En effet, les polymères tels que le PVC ou les polyéthylènes



à retardateurs de flamme forment des résidus charbonneux dont la porosité et la conductivité thermiques sont mal connues mais influent grandement sur leur vitesse de dégradation. Nous cherchons donc un modèle de conductivité apparente de ces résidus, analysés par tomographie, en mettant en œuvre des méthodes d'homogénéisation. Ce modèle sera implémenté dans le code de simulation de la pyrolyse ISIS de l'IRSN. Sa pertinence sera vérifiée en comparant des simulations de pyrolyse avec des résultats d'essais sous cône calorimètre. Dans un deuxième temps, nous utiliserons le code ISIS pour simuler et caractériser l'échauffement d'un chemin de câbles horizontaux soumis à un stress thermique représentatif de ceux observés au sein des chemins.

Le travail réalisé jusqu'à présent a consisté à prendre en main des outils de traitement des tomographies et d'homogénéisation thermique des milieux poreux développés par Jean François Thovert (Institut Pprime, Poitiers) sur des matériaux-test. Des études de sensibilité à différents paramètres (seuillage/nettoyage des tomographies, maillage des échantillons, conditions limites imposées, écart entre les différents codes , etc.) ont été menées. Cette prise en main permettra d'effectuer des études systématiques sur les matériaux intervenant dans les feux de chemins de câbles.

## Sujet de la thèse :

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

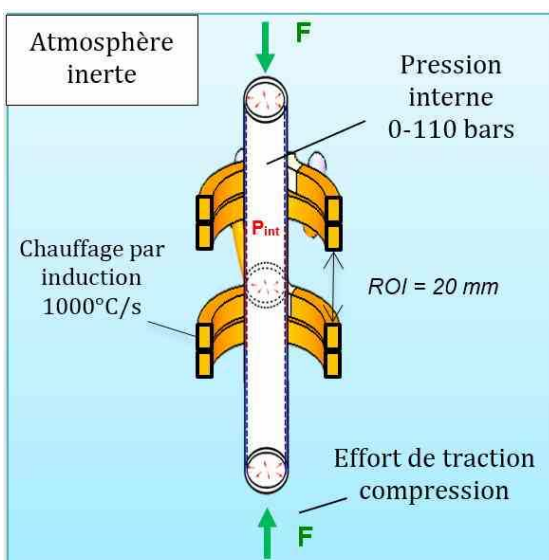
Doctorant :	Thomas JAILIN
Date du début de la thèse :	03 / 11 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / LE2M
Tuteur de thèse :	Jean DESQUINES, Vincent GEORGENTHUM
Directeur de thèse :	Marie-Christine BAIETTO (INSA de Lyon)
Ecole doctorale :	Université de Lyon, MEGA (Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique)
Financement de thèse :	co-financement IRSN / EDF

Le comportement thermomécanique de la gaine lors d'un RIA (accident d'insertion de réactivité) est relativement bien connu lors de la phase initiale du transitoire (PCMI : Pellet Clad Mechanical Interaction), où la température de la gaine est faible et la déformation imposée par la dilatation thermique du combustible. Il n'en est pas de même lors de la phase de crise d'ébullition (post-DNB) où la température et la vitesse de chauffe de la gaine peuvent être très élevées (1 000 à 10 000°C/s) sous pression interne. C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse : ils visent à identifier de façon expérimentale le comportement thermomécanique de la gaine dans des conditions représentatives d'un RIA, plus spécifiquement lors de la phase post-DNB de l'accident.

A ces fins, la méthode développée à l'INSA de Lyon par D. CAMPELLO, d'identification du comportement au fluage d'une gaine de Zircaloy-4 sous conditions thermomécaniques représentatives d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), va être adaptée au cas de transitoires thermiques rapides plus représentatifs d'un RIA (1000°C/s). La démarche consiste à appliquer un chargement thermomécanique hétérogène à l'éprouvette et à mesurer par des méthodes optiques les champs de températures et de déplacement en surface de l'éprouvette. Les paramètres d'une loi de comportement sont ensuite identifiés par recalage par éléments finis (FEMU). Cette méthodologie permet de réduire sensiblement le nombre d'essais nécessaires à l'identification du modèle du fait de la richesse des résultats obtenus lors d'un essai.

Les verrous identifiés sont de plusieurs types : le passage à un transitoire rapide implique de nombreuses problématiques liées à la perte d'axisymétrie de l'essai et impose une mesure couplée des champs thermiques et cinématiques dans la ROI (Region Of Interest). D'un point de vue modélisation, il est nécessaire de bien représenter le couplage thermo-métallurgique au

moment du changement de phase allotropique ( $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ ), qui, à ces vitesses de chauffe, ne respecte pas l'équilibre thermodynamique. Finalement, la nouvelle loi identifiée devra être implémentée dans SCANAIR qui simule de manière semi-intégrale le comportement thermomécanique d'un crayon combustible lors d'un RIA.



## Sujet de la thèse :

Modélisation d'évolutions de configurations du corium en fond de cuve  
en cas d'accident grave

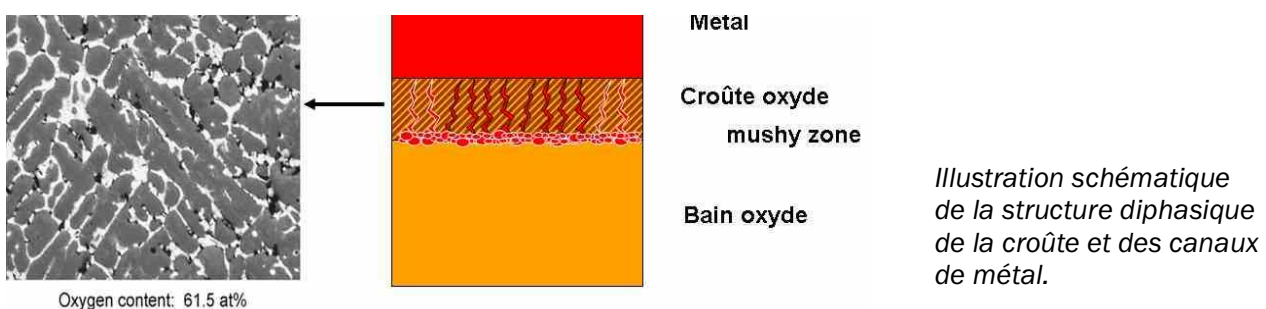
Doctorant :	Shambhavi NANDAN
Date du début de la thèse :	04 / 01 / 2017
Laboratoire :	PSN-RES / SAG / LEPC
Tuteur de thèse :	Florian FICHOT
Directeur de thèse :	Hervé COMBEAU – Mines de Nancy et Lounès TADRIST - IUSTI
Ecole doctorale :	Univ. Aix-Marseille / Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nano-électronique
Financement de thèse :	Projet européen H2020 IVMR

Au cours d'un accident grave tel que ceux ayant eu lieu à la centrale de Fukushima-Daiichi, le cœur du réacteur peut fondre et couler vers le fond de la cuve. Dans cette situation, une stratégie pour stopper la progression du corium (mélange de matériaux du cœur), dite de rétention en cuve, consiste à refroidir le fond de la cuve par de l'eau avec un dispositif externe dédié.

Le contexte général de la thèse concerne l'amélioration des modèles utilisés pour évaluer l'efficacité de la rétention en cuve du corium par refroidissement externe. L'ensemble de cette démarche d'amélioration des modèles et de proposition d'une méthodologie concertée entre de nombreux partenaires européens fait l'objet du projet européen IVMR piloté par l'IRSN.

Plus précisément, cette thèse concerne l'interprétation des essais du programme CORDEB réalisé au NITI (Russie) pour l'IRSN. Ces essais sont réalisés avec des matériaux prototypiques ( $UO_2$ , Zr et acier) et ont été définis pour étudier spécifiquement des évolutions transitoires des configurations du bain de corium et des débris telles qu'elles sont susceptibles de se produire en cas d'accidents. Ces évolutions transitoires ont un impact significatif sur les chargements thermiques de la paroi de la cuve. Après relocalisation massive de corium en fond de cuve, une configuration très probable est celle d'un bain oxyde couvert par une couche de métal (principalement de l'acier), les deux couches étant séparées par une mince croûte. Les essais CORDEB ont montré que cette croûte ralentit de façon très significative les transferts de masse entre la phase oxyde et la phase métal, ce qui a des conséquences sur l'épaisseur de la couche de métal et donc sur les transferts de chaleur vers la cuve (*focusing effect*).

Le sujet principal de la thèse consiste donc à modéliser le transfert du métal à travers une croûte initialement constituée d'un oxyde  $(U,Zr)O$  sous-stœchiométrique. Le modèle de transport d'espèces à travers la croûte sera intégré dans le code ASTEC afin d'aboutir à une représentation améliorée des bains oxyde-métal stratifiés, ce qui permettra de mieux évaluer les temps d'existence de couches métalliques minces susceptibles de conduire à des flux de chaleur importants sur la cuve.



## Sujet de la thèse :

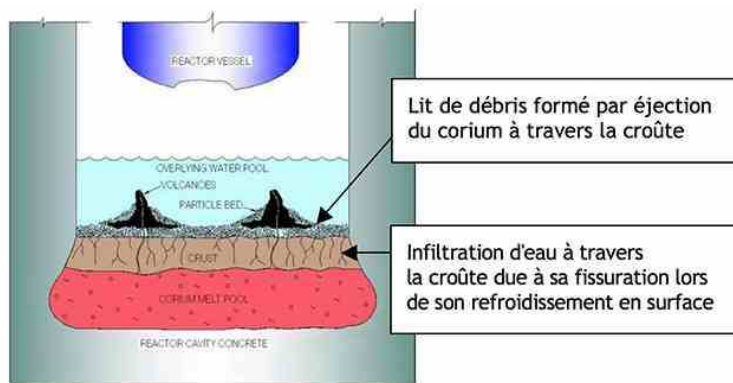
Modélisation et analyse des processus de refroidissement sous eau  
des bains de corium en interaction avec le béton

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

La perte prolongée du refroidissement d'un réacteur nucléaire peut conduire à la fusion du combustible et des matériaux de structure l'environnant en un magma appelé corium comme mis en évidence récemment à Fukushima. Ce corium surchauffé porte une puissance résiduelle du fait de la présence d'éléments radioactifs et il peut conduire à une mise en défaut du confinement du réacteur en cas d'interaction avec le béton du radier de l'enceinte.

L'injection d'eau sur le dessus du corium pour le refroidir et le stabiliser hors-cuve est un moyen envisagé de mitigation de la progression d'un accident grave dans le cadre des analyses relatives à l'extension de la durée de vie des réacteurs français (DDF), et représente donc un enjeu fort de sûreté.

A l'issue d'un nombre assez important d'expériences réalisées, les mécanismes fondamentaux du refroidissement ont été identifiés (figure). Cependant, du fait de leur complexité, leur compréhension phénoménologique est incomplète et les modèles développés sont incertains. Au-delà de la complexité des phénomènes eux-mêmes, les expériences manquent de représentativité par rapport au cas réacteur.



L'IRSN est engagé dans un programme expérimental réalisé à ANL (Argonne National Laboratory), conduit par EDF, dénommé CCI, avec notamment les trois essais réalisés récemment CCI-7, CCI-8 et CCI-9 ; les résultats de l'essai CCI-9 sont en cours d'analyse. Fin 2017, un essai CCI-10 complémentaire sera réalisé.

L'objectif de la thèse est de proposer une modélisation mécaniste de type CFD de la phénoménologie pour interpréter les expériences puis extrapoler la phénoménologie identifiée et modélisée aux conditions attendues des situations accidentelles dans le cas de réacteur.

La modélisation sera développée en s'appuyant sur l'approche générique de l'interaction corium-eau (ICE) mise en œuvre dans le logiciel de thermohydraulique multiphasique MC3D. Les processus d'ablation du béton seront présupposés (en conditions limites).

Les résultats de la thèse seront pris en considération par les équipes de l'IRSN pour développer une modélisation simplifiée pour le logiciel ASTEC de simulation de la progression et des conséquences des accidents en réacteurs.

**Sujet de la thèse :**

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

<b>Doctorant :</b>	<b>Benjamin BLAISOT</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03 / 11 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SCA / LPMA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Emmanuel PORCHERON</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Véronique ROÏG – Institut de mécanique des fluides de Toulouse</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>INP Toulouse / MEGEP</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>

---

Dans le cadre de la construction du *tokamak* ITER, il est nécessaire pour l'IRSN de disposer de connaissances pour évaluer les termes sources de contamination susceptibles d'être relâchés dans l'environnement lors de différents scénarios d'accident. Dans le cas d'une perte de vide accidentelle causée par la rupture d'une canalisation du circuit de refroidissement, de l'eau sous pression et surchauffée peut être injectée dans la chambre du tokamak (accident appelé ICE, *Ingress of Coolant Event*). Cette eau se vaporisera brutalement du fait du changement de pression, passant de plusieurs bars au vide ( $10^{-7}$  Pa dans le tore d'ITER). Une telle vaporisation, aussi appelée *flash-boiling*, provoque une évaporation rapide du liquide dès la sortie du jet voire même dans le circuit de refroidissement en amont de la brèche. De cette évaporation découle une atomisation violente par effet thermique, semblable à de l'atomisation effervescente, qui disperse le liquide à des angles pouvant dépasser les 90°.

Au sein d'ITER, les parois métalliques de la chambre à vide du *tokamak* seront érodées par le plasma, ce qui produira des quantités importantes de poussières de béryllium et de tungstène susceptibles d'être mobilisées lors de l'ICE. L'évaluation des conséquences d'explosions de poussières et d'hydrogène sur la tenue du confinement nécessite donc d'étudier les phénomènes physiques influençant la mobilisation des poussières dans la chambre à vide.

Le but de ma thèse est d'étudier la mise en suspension des poussières par l'injection d'eau sous condition de *flash-boiling* en cas d'accident de type ICE.

Dans un premier temps, des approches expérimentale et numérique du phénomène de flash-boiling seront effectuées pour bien comprendre les mécanismes mis en jeu afin d'investiguer, dans un second temps, les phénomènes d'interaction entre les poussières et l'évaporation éclair du jet.

La conception d'une petite chambre à vide permettant l'étude analytique de l'évaporation éclair de jets d'eau a été effectuée ces derniers mois. Cette chambre sera instrumentée avec différents diagnostics optiques pour caractériser l'écoulement multiphasique résultant, tel que la PIV (*Particle Image Velocimetry*) rapide, l'ombroscopie et la PDA (*Phase Doppler Anemometry*).

En parallèle, la prise en main d'un code de calcul d'évaporation de gouttelette et son extension aux conditions ITER sont en cours (ACACIA).

## Sujet de la thèse :

### Développement et qualification de méthodes non-destructives ultrasonores pour la détection de réactions de gonflement interne de structures en béton

Doctorant :	Florian OUVRIER-BUFFET
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Tuteur de thèse :	Benoit DURVILLE
Directeur de thèse :	Vincent GARNIER - LMA
Ecole doctorale :	Aix-Marseille Université / ED353
Financement de thèse :	IRSN

Le projet national ODOBA, coordonné par l'IRSN, a pour objectif de suivre dans le temps deux pathologies qui pourraient affecter les bétons d'enceintes et les radiers des centrales : la Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alkali Granulat (RAG). Leurs suivis et caractérisations par contrôles non destructifs n'ont été abordés que récemment, dans le domaine des barrages notamment. La combinaison de l'acoustique linéaire et non linéaire permettrait la détection de ces phénomènes. Les méthodes de mesure existent mais nécessitent néanmoins des développements pour la partie non linéaire, notamment en vue d'une application *in situ*.

Le premier objectif de la thèse est de détecter le plus précocement possible l'existence des pathologies dans des massifs de béton. Après avoir été détectées, le second objectif est d'en caractériser l'étendue dans la profondeur, ce qui est un des enjeux principaux du fait de la forte atténuation du signal dans le béton.

Les essais porteront sur trois échelles, croissantes en échelle et en complexité :

- De petites éprouvettes (type 7x7x28 cm) permettront de s'assurer de la détection précoce des pathologies et d'étalonner les différentes techniques, ce qui constituera une première étape de faisabilité.
- Des éprouvettes de dimensions intermédiaires (type 50x50x50 cm) permettront une première étape de transposition à l'échelle site, avec une atténuation et des gradients plus importants.
- Enfin les blocs du projet ODOBA, d'épaisseur analogue à une enceinte de centrale (2x1x4 m), permettront le développement de l'instrumentation destinée à une utilisation sur site. Les blocs subiront des prélèvements pour Essais Destructifs, afin de confirmer l'évolution des pathologies en fonction de la profondeur.

La cinétique des pathologies de gonflement étudiées ici est lente lors de son initiation, puis augmente rapidement à partir d'un seuil. Pour le suivi il est proposé de développer une surveillance permanente du béton par Emission Acoustique (Monitoring) ainsi qu'une surveillance régulière par Acoustique Non-Linéaire afin de détecter les premiers signes de formation des gels gonflants et des fissures liées.



Ces informations permettront d'initier une seconde phase de positionnement et de dimensionnement de l'endommagement par tomographie ultrasonore linéaire et non linéaire.

En parallèle au développement des END, une attention particulière sera apportée à la représentativité des procédés de vieillissement accélérés.

Le travail se déroule dans une 1<sup>ère</sup> phase à Toulouse (LMDC) pour la mise au point de certaines techniques d'analyse puis à Aix en Provence (LMA) et Cadarache (IRSN) pour la transposition à des blocs de béton de plus grande taille.

**Sujet de la thèse :****Étude microphysique du lessivage des particules radioactives par les nuages :  
influence de la charge électrique des aérosols**

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

---

Pour prédire les conséquences radiologiques d'un accident nucléaire, l'IRSN développe des modèles simulant la dispersion et le dépôt des aérosols radioactifs dans l'environnement. Le dépôt des particules est très sensible à deux mécanismes : les lessivages sous le nuage (*washout*) et dans le nuage (*rainout*). Ma thèse se focalise sur le *rainout*. Des études récentes ont d'ailleurs montré que 60 % du lessivage total de l'atmosphère était lié à ce mécanisme.

Une première étape consiste à étudier les mécanismes microphysiques régissant le *rainout* : la collecte par les gouttelettes et l'activation des aérosols en gouttelettes par condensation. Dans cette étude, deux approches sont déployées. La première consiste à exploiter un modèle de formation de nuage appelé DESCAM (DEtailed SCAvenging Model) pour étudier l'impact des mécanismes microphysiques sur la dynamique du nuage (action déjà démarrée). La deuxième vise à quantifier expérimentalement certains des mécanismes microphysiques intervenant sur le rabattement dans le nuage. Les aérosols radioactifs se chargeant naturellement, des efforts particuliers seront portés sur les forces électriques et le phénomène de charges images. En effet, la littérature soulève des interrogations récurrentes sur ces effets électrophorétiques comme étant responsables d'une augmentation de la collecte des aérosols dans les nuages de plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, l'enjeu est de simuler en laboratoire une atmosphère représentative d'un nuage en contrôlant soigneusement les conditions thermodynamiques afin de mesurer des efficacités de collecte pour des aérosols représentatifs (en granulométrie et en charge électrique) de ceux rejetés lors des accidents nucléaires. En conséquence, des modèles de charges images et de charge des aérosols radioactifs ont été implémentés pour déterminer les valeurs théoriques des efficacités de collecte <sup>[1]</sup> et la charge portée par des aérosols radioactifs <sup>[2]</sup>.

Il s'agira de qualifier un modèle de charges images comme effet moteur du *rainout* et de l'intégrer dans le modèle DESCAM. Pour ce faire, des modifications importantes sont en cours dans ce modèle de nuage pour caractériser le rabattement d'aérosols chargés pour différentes natures de nuages – convectives ou stratiformes. À terme, des abaques du lessivage par les nuages seront établis et pourront être ajoutés aux modèles de l'IRSN.

[1] Tinsley, B. A., Rohrbaugh, R. P., Hei, M., & Beard, K. V. (2000). Effects of image charges on the scavenging of aerosol particles by cloud droplets and on droplet charging and possible ice nucleation processes. *Journal of the atmospheric sciences*, 57(13), 2118-2134.

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

## Sujet de la thèse :

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

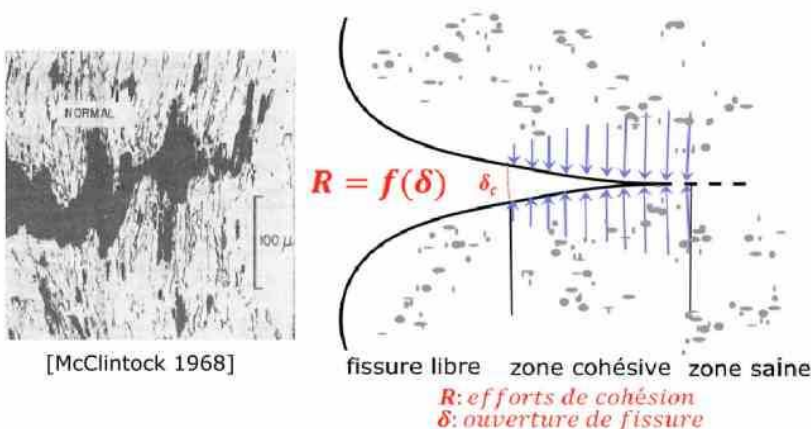
Doctorant :	Noé Brice NKOUMBOU KAPTCHOUANG
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2016
Laboratoire :	PSN-RES / SEMIA / LPTM
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Directeur de thèse :	Yann MONERIE – LMGC, Université de Montpellier
Ecole doctorale :	ED 166 Information Structures Systèmes, Montpellier
Financement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

Ce travail de thèse concerne le comportement du combustible nucléaire en dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) lors de transitoires accidentels de puissance. Ce matériau est une céramique poreuse présentant un comportement fragile à basse température et ductile à haute température (température de transition d'environ 1200°C). En situation accidentelle de type RIA (Reactivity Initiated Accident), des températures élevées (supérieures à la limite de ductilité) couplées aux chargements mécaniques conséquents peuvent conduire à la fissuration des pastilles de combustible. Une bonne prédiction de cet endommagement est importante afin de mieux caractériser les phénomènes qui génèrent des contraintes thermomécaniques subies par la gaine, la première barrière de sûreté, lors d'un RIA.

Ce travail aborde le thème de la modélisation et de la simulation numérique de l'endommagement et de la rupture ductile à l'aide des modèles de zones cohésives (MZC). Les variables du nouveau modèle devront dépendre de la température afin de simuler l'augmentation de la ductilité avec la température. L'application visée concerne la simulation du gonflement et de la fissuration d'un fragment de céramique poreuse avec cavités sous pression, telle le combustible UO<sub>2</sub> irradié lors d'un RIA.

Un premier modèle d'endommagement ductile volumique de type « GTN » (modèle poro-mécanique de Gurson) a été développé sous la forme d'un modèle MZC au moyen d'une analyse micromécanique. Durant la première année de thèse, il est prévu d'implémenter ce nouveau modèle dans le code de calcul XPER (logiciel développé à l'IRSN permettant de simuler la fragmentation dynamique des milieux hétérogènes). Ensuite, la vérification de la pertinence de cette nouvelle classe de modèles et de son implémentation ainsi qu'une

première phase de validation sera conduite par comparaison à des essais disponibles dans la littérature. Les perspectives pour la deuxième année de thèse sont relatives à l'identification des paramètres du nouveau modèle pour le matériau d'étude, afin d'aboutir, in fine, à la simulation avec XPER d'un morceau de pastille de combustible en RIA (troisième année de thèse).





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

<b>Doctorant :</b>	<b>Adrien SOCIÉ</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>09 / 10 / 2016</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES / SEMIA / LPTM</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric PERALES</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yann MONERIE – Laboratoire Mécanique et Génie Civil</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>I2S Université Montpellier</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>

---

Dans le cadre de l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires, ce travail de thèse se concentre sur le vieillissement des matériaux cimentaires des enceintes de confinements. Les dégradations de ces matériaux sont dues à des pathologies liées aux conditions environnementales et à la microstructure du béton. Les processus de fissuration et leurs conséquences mécaniques ou en termes de perméabilité sont décrits à l'échelle des granulats et sont modélisés par un Volume Élémentaire Représentatif (VER). A cette échelle, le laboratoire commun MIST (IRSN-CNRS-UM) a développé une méthodologie micromécanique pour l'étude fine de l'amorçage de multifissures, de leur propagation et des phénomènes post-rupture en milieux hétérogènes. Cette approche est basée sur une partition volumique/surfacique aux éléments finis : chaque maille porte un comportement durcissant et chaque arête entre mailles porte un comportement adoucissant lié à la fissuration (zone cohésive). Une récente thèse [L. Bichet, 2017] a montré que cette approche, couplée à une modélisation thermo-mécanique et à une démarche micromécanique adaptée, permet de modéliser l'interaction entre fissuration et diffusion thermique au sein des matériaux cimentaires vieillissants et dégradés.

L'objectif de ce travail de thèse est la compréhension à l'échelle du VER de l'impact d'une dégradation chimique telle que la réaction sulfatique interne (RSI) sur la perméabilité-ténacité du matériau. La RSI est une pathologie endogène issue d'une exposition à des températures supérieures à 65°C et à forte humidité relative. Elle est causée par une formation tardive d'une espèce chimique, l'ettringite, dans le matériau durci entraînant un gonflement de la pâte de ciment et une fissuration du matériau. Les fissures créées constituent alors le lieu privilégié de la précipitation d'ettringite.

Un modèle thermo-hydro-mécanique est pressenti afin de décrire le transport d'espèces dans le milieu poreux qu'est la pâte de ciment, l'impact des fissures sur la perméabilité effective et la réponse mécanique du béton. Le comportement volumique sera issu d'une étude micro-poro-mécanique prenant en compte le gonflement local dû à la RSI, les retraits de dessiccation ainsi que les hétérogénéités spatiales de comportement viscoplastique. Le comportement cohésif, décrivant la fissuration, devra prendre en compte la présence de l'ettringite et ses conséquences sur la diffusion.

Le modèle sera ensuite implémenté dans le code Xper développé dans le cadre du MIST. Une étude numérique permettra d'une part de comprendre l'impact de la fissuration sur la perméabilité d'un matériau dégradé par la RSI et d'autre part de fournir des lois équivalentes poro-mécaniques pour l'échelle macroscopique.

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

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

---

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



La précédente thèse de Yixian ZHOU (2013-2016) a notamment permis d'établir la loi de vidange d'un réservoir avec un orifice placé latéralement, ce qui représente la configuration d'écoulement pertinente pour le combustible hors de la gaine, pour un milieu granulaire, représentant les fragments de combustible. Cependant le mécanisme conduisant à cette loi n'a pas été totalement clarifié. Dans ce but, une première étude est menée pour comprendre le rôle de la zone morte au sein du réservoir sur la valeur du débit. Pour cela, nous étudions l'influence d'un angle d'inclinaison du fond du réservoir sur le débit de vidange des grains (voir la figure). Les champs de vitesse sont mesurés par corrélation d'image. En support à l'interprétation de ces expériences, différentes hypothèses de modélisation de l'écoulement (population discrète de

particules, milieu continu avec une rhéologie visco-plastique) sont confrontées aux résultats expérimentaux à l'aide de simulations numériques.

En perspective, nous utiliserons les connaissances acquises pour étendre leur applicabilité à des situations plus similaires à la configuration d'intérêt, dans des conditions non encore explorées. Ainsi, nous considérerons la vidange d'un réservoir initialement pressurisé, puis la sortie au sein d'un liquide. Nous varierons également les caractéristiques du milieu granulaire en considérant un mélange de particules de plusieurs tailles. Ces études expérimentales seront accompagnées d'études théoriques et de simulations numériques.

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

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

---

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

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

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

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

# L'ADi[N]

ASSOCIATION  
DES DOCTORANTS  
DE L'IRSN

Qu'est-ce que l'Adi[N] ?

Notre but est de rendre ton séjour à l'IRSN inoubliable et de t'aider à préparer ton avenir post-IRSN en toute tranquillité (parce que tout bonne chose a une fin...)

## Notre programme ?

L'Adi[N] t'accompagne au cours de ta thèse

- Formations,
- Aide à la préparation d'oraux et de posters,
- Café franglais...

Faire grandir ton réseau personnel...

- Soirées et jeux lors des Journées des Thèses,
- Sorties ludiques (Manoir de Paris, Escape Rooms...),
- Week-end dans le sud de la France...

Mais aussi professionnel !

- Cartes de visite,
- Visites de laboratoires...

Comment nous rejoindre ? Rien de plus simple !  
Remplis le formulaire d'inscription sur :

[www.adinasso.com](http://www.adinasso.com)

## Sur la toile !



### Les membres du bureau



Nadia BENABDALLAH  
Présidente



Tiffany BEAUMONT  
Trésorière



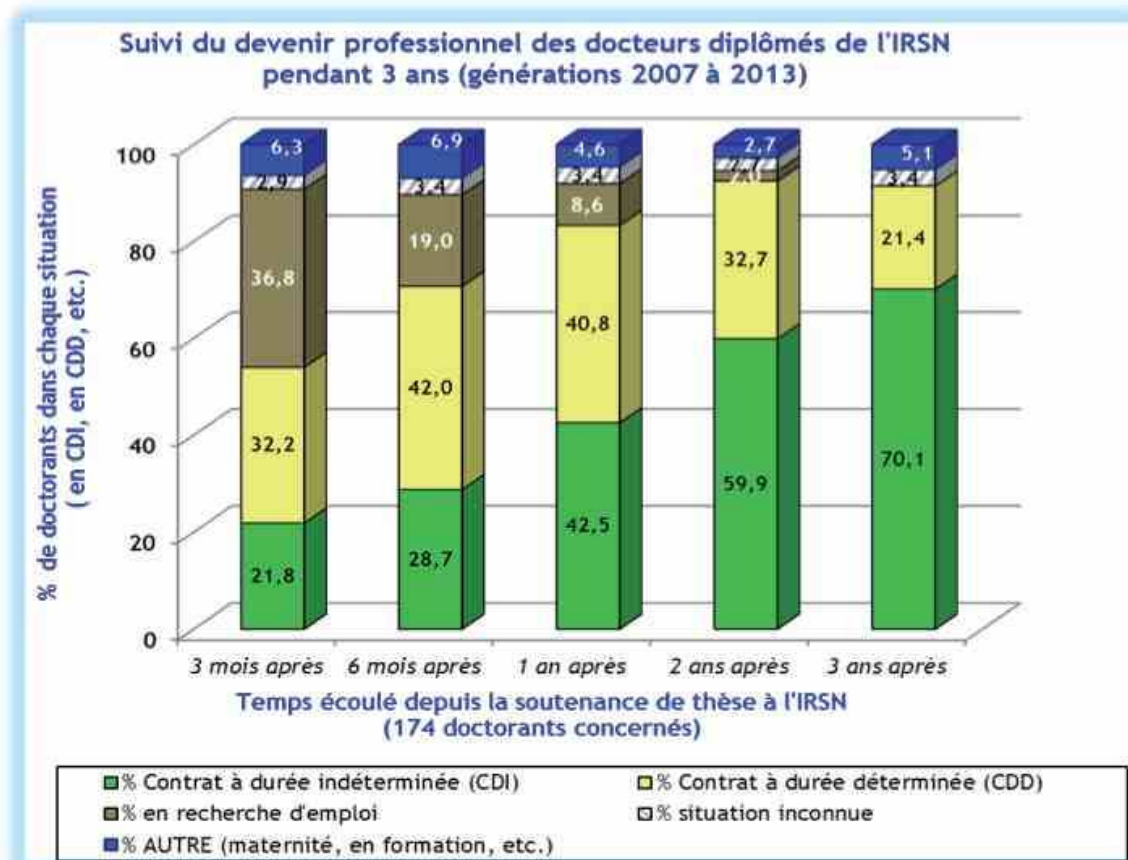
Frédéric SOYSOUVANH  
Secrétaire

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

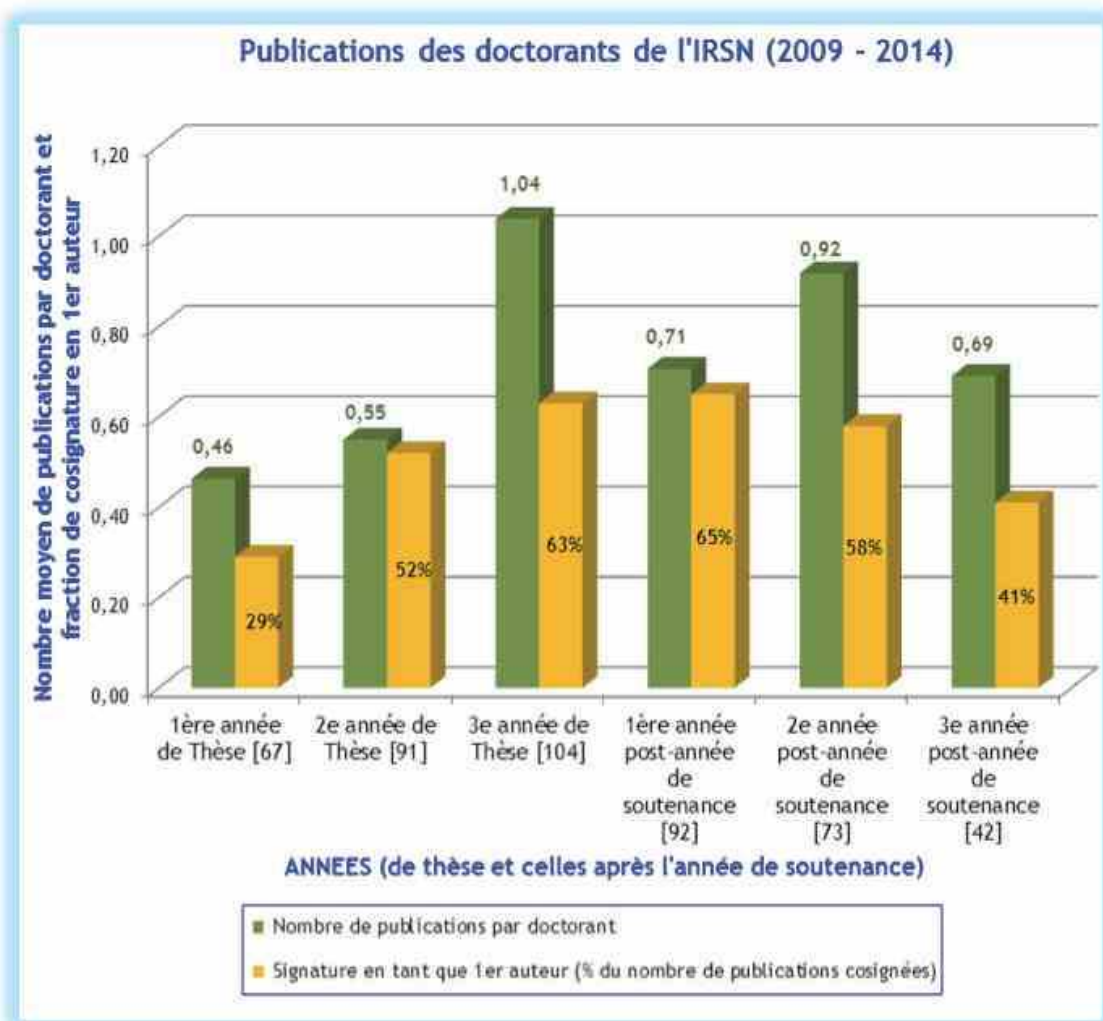
## L'INSERTION PROFESSIONNELLE DES DOCTORANTS DE L'IRSN (2009 – 2014) ET LEURS PUBLICATIONS

Irène SOROKINE-DURM (DSDP/SPS)

Plus d'une centaine de doctorants et de post-doctorants sont présents annuellement à l'IRSN. Une enquête annuelle auprès de leurs tuteurs permet de connaître leurs situations professionnelles à diverses périodes dans les 3 ans après leurs soutenances (ou fin de post-doctorat). Alors que le taux de chômage à 3 ans est de 22,7% pour les diplômés de 2010 selon le ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (source : Céreq), le suivi du parcours professionnel des 174 doctorants ayant soutenu leur thèse de 2007-2013 à l'IRSN révèle un taux de chômage quasi nul au bout de 3 ans. De plus, alors que le taux d'emploi à durée déterminée avoisine les 35% à 3 ans (source : Céreq), celui des docteurs issus de l'IRSN n'est que de 21,4% avec 70% de docteur en contrat à durée indéterminée.

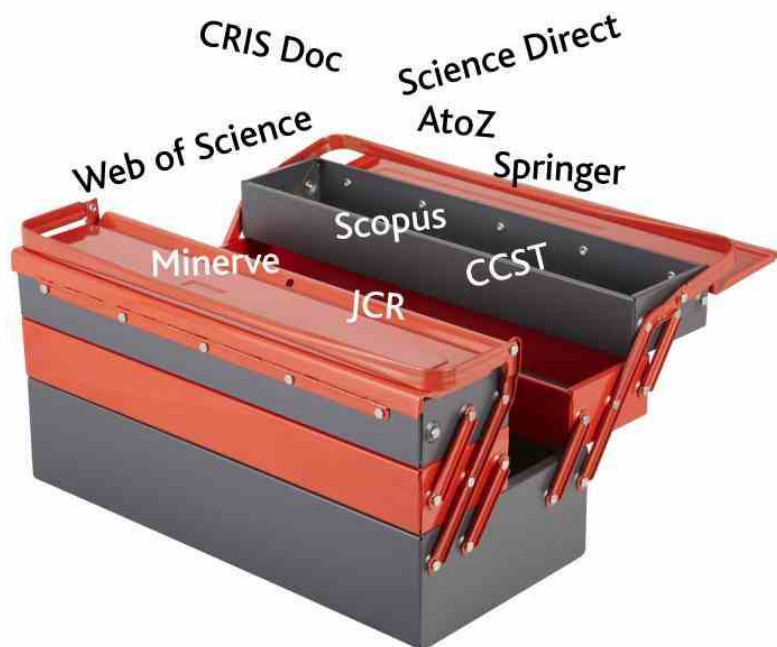


Pour pouvoir soutenir une thèse, il faut publier ses résultats de recherche, à l'IRSN, un certain nombre de doctorants participent aux publications de leur unité d'accueil dès la première année et ont une publication à leur actif en 3e année (taux moyen). Le taux de publication en premier auteur croît régulièrement au cours de la thèse et les publications continuent à paraître au moins 3 ans après le départ des nouveaux diplômés de l'IRSN (cf. fig. ci-après, les nombres de doctorants copublicants ayant participé aux calculs des taux moyens sont indiquées entre crochets).



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

Rechercher, commander, veiller, publier



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

Cliquez sur  sur l'intranet de l'IRSN

OU

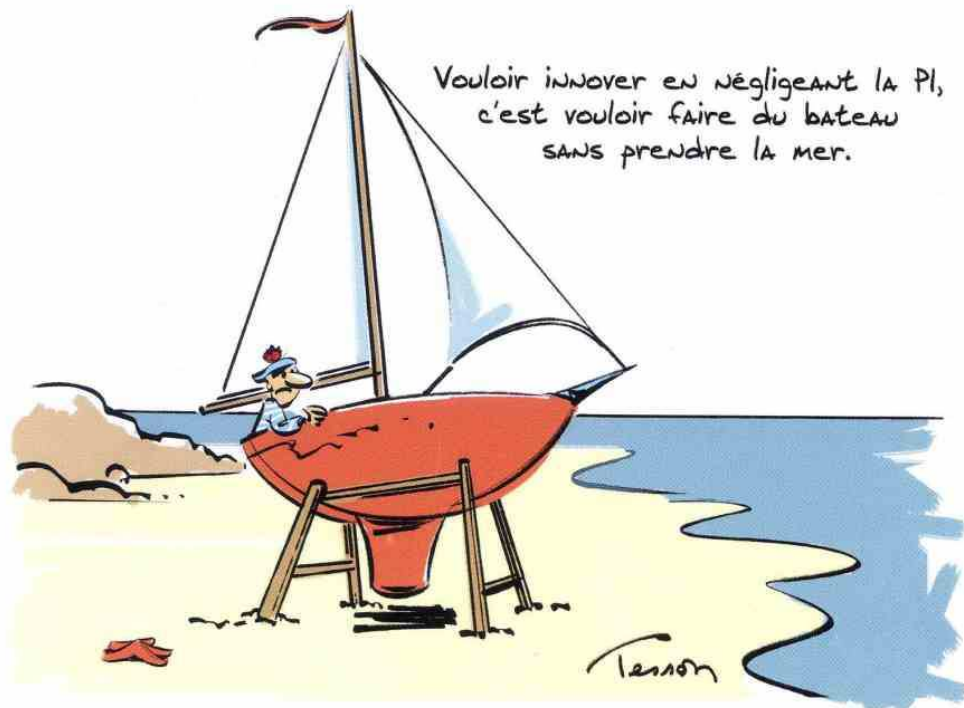
[irsn\\_cris@irsn.fr](mailto:irsn_cris@irsn.fr)

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

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

...

Pensez à la propriété intellectuelle !



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

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



## LISTE DES PARTICIPANTS ET INDEX DES PRÉSENTATIONS

ABBATE Adrien	IRSN / PSN-RES/SEMIA/LIMAR	49
ADAM-GUILLERMIN Christelle	IRSN/PRP-ENV/STEME/LMN	
AIGUEPERSE Jocelyne	IRSN/PRP-HOM	
ALIBERT David	AMU & IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	32
ALILOU Youssef	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	79
ALLELEIN Hans-Josef	Université d'Aachen & PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	
ALONZO Frédéric	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
ANCELET Sophie	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	
ARCANJO Caroline	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	22
ARMANT Olivier	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
AUDOUIN Laurent	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
AUSSILLOUS Pascale	Université Aix Marseille - CNRS, IUSTI	
BABUT Marc	IRSTEA	
BACCOU Jean	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
BAILLY DU BOIS Pascal	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC	
BAIZE Stéphane	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	
BARBIER Gauzelin	IRSN/DSDP/SPS	
BARDIN-MONNIER Nathalie	Université de Lorraine, LRGP	
BARNICHON Jean-Dominique	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	
BARRACHIN Marc	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
BEAUMONT Tiffany	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	72
BELERRAJOUL Mohamed	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	82
BEN DAOUED Amine	UTC COMPIEGNE & IRSN/PRP-DGE/SCAN/BEHRIG	101
BEN KACEM Mariam	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	109
BENABDALLAH Nadia	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	74
BENALLAL Nadia	BERTIN TECHNOLOGIES	
BENTAIB Ahmed	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	
BERTHO Annaïg	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	111
BLAISOT Benjamin	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	124
BONNET Jean-Michel	IRSN/DSDP	
BONTEMPS Alice	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	110
BOSLAND Loïc	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
BOTTOLLIER DEPOIS Jean-François	IRSN/PRP-HOM	
BOUET-RIVOAL Ségolène	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	54
BOUILLOUX Laurent	IRSN/PSN-RES/SCA	
BOURACHOT Philippe	IRSN/PSN-RES/SA2I	
BOURGOIS Thierry	IRSN/DSDP/SPS	
BOURROUS Soleiman	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	
BOYER Germain	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
BOYER Patrick	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	
BRITEL Manon	Université Lyon II & IRSN/PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS	119
BRUNISSO Alain	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	
CARUSO Roberto	CNRS - ICARE & IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	29
CAZALA Charlotte	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LT2S	
CHAKRABORTY Aryadeep	Ecole des Mines & IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	30
CHARMASSON Sabine	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	

CHARTIER Thomas	ENS Ulm & PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	102
CHAUMEIX Nabiha	ICARE - CNRS Orléans	
CHEVALIER-JABET Karine	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
CHOJNACKI Eric	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
CLAVEL Jean-Baptiste	IRSN/PSN-EXP/SNC/LNC	
COINDREAU Olivia	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	
COLNOT Julie	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	108
COPPIN Frédéric	IRSN/PRP-ENV/SERIS/L2BT	
COUSIN Frédéric	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
COUTIN Mickaël	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	
DARIDON Loïc	Univeristé de Montpellier - LMGC	
DAVID Sylvain	Institut de Physique nucléaire d'Orsay	
DE SANTIS Audrey	UMAPS Communication	
DELAUME Eric	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	11
DÉPÉE Alexis	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	126
DESBRÉE Aurélie	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
DESQUINES Jean	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	
DINOCOURT Céline	IRSN/DSDP/SPS	
DUBOIS Cécile	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	25
DUBOIS Brigitte	IRSN/DSDP/SPS	
DUCHER Roland	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
DUCROS Loïc	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	92
DUMONTEIL Eric	IRSN/PSN-EXP/SNC	
DURIEZ Christian	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	
DURVILLE Benoit	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	
DUVAL Fabien	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
EVARD Jean-Michel	IRSN/PSN-RES	
EYMEOD Paul	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	84
EYROLLE-BOYER Frédérique	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	
FERRACCI Thomas	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	90
FERRY Laura	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	65
FEVRE NOLLET Valérie	Université de Lille I	
FEVRIER Laureline	IRSN/PRP-ENV/SERIS/L2BT	
FICHOT Florian	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	
FLOURET Alexandre	IRSN/PRP-ENV/SERIS/L2BT	107
FORTIN Camille	Université de Lille & PSN-RES/SAG/LETR	17
FOURNIER Lucie	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	52
FRANCK Didier	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
FRANCOIS Agnès	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	
FRELON Sandrine	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
FRÉNEAU Amélie	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LDB	36
GAGNAIRE Béatrice	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
GAJAVALLI Kasi	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	98
GARLAND Nicolas	IRSN/PSN-EXP/SNC	41
GARNIER Vincent	Laboratoire de mécanique et acoustique	
GARNIER-LAPLACE Jacqueline	IRSN/PRP-ENV	
GASNOT Laurent	Université de Lille I	
GAY Didier	IRSN/PRP-DGE	
GELAIN Thomas	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	

GEORGENTHUM Vincent	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
GESTIN Mathilde	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	86
GILBIN Rodolphe	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	
GIORDANO Patrice	IRSN/PSN-RES/SAG	
GIOT Michel	Université catholique de Louvain	
GLANTZ Tony	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
GONÇALVÈS Julio	CEREGE- Europôle Méditerranéen de l'Arbois	
GONZALEZ Richard	IRSN/PSN-RES	
GOUMRI Ismail	IRSN/PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS	59
GREGOIRE Anne-Cécile	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	
GRISON Stéphane	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	115
GROSSEUVRES Romain	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	28
GUÉDON Rémi	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	105
GUEGUEN Yann	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	
GUILLARD Gaétan	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
GUYOT Isabelle	IRSN/DSDP/SCOSI/BIPE	
HAMDI Yasser	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BEHRIG	
HANOZET Romain	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	80
HIJAZI Houssam	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	16
HOCINE Nora	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
HOFFMANN Sabine	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	53
HUET Christelle	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	
ISBILIROGLU Levent	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	42
JABBOUR Jacques	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	10
JACQUEMIN Manon	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	112
JADON Ankita	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	64
JAILIN Thomas	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	121
JAISWAL Vaibhav	IRSN/PSN-EXP/SNC/LNR	43
JEFFROY François	IRSN/PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS	
JOÉSSEL Louis	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	85
KAISSOUN Salima	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	78
KANGNI-FOLI Ekoé	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	104
LABORDE Jean-Claude	IRSN/PSN-RES	
LALOI Patrick	IRSN/DSDP/SPS	
LANCIERI Maria	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	
LAPIERE Alexia	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LR2I	114
LASCAR Éric	Université de Strasbourg & PRP-ENV/SESURE/LEREN	69
LATCHE Jean-Claude	IRSN/PSN-RES/SA2I	
LAURENT Olivier	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	
LAVIGNE Jérémy	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	34
LE Ngoc Bao Tran	IRSN/PRP-CRI/SESUC/BMCA	100
LE DIZES-MAUREL Séverine	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRTE	
LEAL Luiz	IRSN/PSN-EXP/SNC/LNR	
LEBSIR Dalila	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	23
LECOMTE-PRADINES Catherine	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
LEMAITRE Pascal	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
LEMOINE Flavien	IRSN/PRP-DGE/SRTG	
LETANG Eric	IRSN/PSN-RES	
LEURAUD Klervi	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	

LINTIS Laura	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	66
MAC Thi Phuong Anh	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	61
MAMEDE Anne-Sophie	Université de Lille, Sciences et Technologies	
MANGEON Mickaël	IRSN/PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS	58
MANGERET Arnaud	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LT2S	
MARANO Sandrine	IRSN/DSDP/BC2S	
MARCHAND Olivier	IRSN/PSN-RES/SEMIA	
MARMIN Sébastien	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	40
MARO Denis	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC	
MARQUIE Christophe	IRSN/PSN-RES/SEREX	
MARTIN-GARIN Arnaud	IRSN/PRP-ENV/SERIS/L2BT	
MARTINET Laurence	IRSN/DSDP/SPS	
MATRAY Jean-Michel	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	
MEIGNEN Renaud	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	
MENSE Maxime	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	31
MERMOUX Michel	LEPMI - Grenoble	
MESLIN Pierre-Yves	Université Paul Sabatier Toulouse	
MILLIAT Fabien	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	
MISS Joachim	IRSN/DSDP/SPS	
MOLINERO GUERRA Agustín	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	13
MONCOFFRE Nathalie	Institut de physique nucléaire de Lyon	
MUN Christian	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
MURAT EL HOUDIGUI Sophia	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	106
NAHAS Georges	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	
NANDAN Shambhavi	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	122
NERISSON Philippe	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	
NIEL Jean-Christophe	IRSN/DG	
NKOUMBOU KAPTCHOUANG Noé Brice	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	127
OBADA Dorel	Université de Lille & IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	97
OMS Pierre-Emmanuel	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC	91
OUF François Xavier	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
OUVRIER-BUFFET Florian	IRSN/PSN-RES/SEREX/L2EC	125
PAQUET François	IRSN/PRP-ENV/SERIS	
PELISSOU Céline	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
PELLERIN Geoffrey	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC	18
PENA CARRILLO Juan David	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	47
PERALES Frédéric	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
PERES Véronique	Ecole des Mines de St Etienne	
PIJOLAT Michèle	Ecole des Mines de St Etienne	
PIPON Yves	IPNL	
PIZZO Yannick	Université Aix Marseille CEREN	
PORTERIE Bernard	Université Aix Marseille	
POURCELOT Laurent	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LEREN	
PREVOST Corinne	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	
QUINTARD Michel	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse	
RABOUN Oussama	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	60
RAJYAGURU Ashish	CEA & PRP-DGE/SRTG/LETIS	14
RAMANATHAN KRISHNAN Adithya	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	81
REINECKE Ernst-Arndt	Forschungszentrum Jülich	

RENARD Hugo	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC	93
RIBAULT Alexandre	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LR2I	37
RIBEIRO Fabienne	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
RICAUD Jean-Marc	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
RICHET Yann	IRSN/PSN-EXP/SNC	
RICCIARDI Laurent	IRSN/PSN-RES/SCA	
RICHARD Jérôme	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	
RICHAUD Myriam	Université de Montpellier - Laboratoire de Toxicologie	
ROGER Mathias	IRSN/PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS	118
ROULIER Marine	IRSN/PRP-ENV/SERIS/L2BT	19
ROUYER Véronique	IRSN/PSN-RES	
RUYER Pierre	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
SABROUX Jean-Christophe	IRSN/PSN-RES/SCA	
SARRASIN Lola	CNRS - IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	96
SCHEIFF Valentin	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	48
SCHULER Matthieu	IRSN/DSDP	
SCOTTI Oona	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	
SHI Jianwei	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	120
SOCIÉ Adrien	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	128
SOROKINE-DURM Irène	IRSN/DSDP/SPS	
SOUIDI Maâmar	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	
SOYSOUVANH Frédéric	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	35
STEFFEN Paul-Martin	Forschungszentrum Jülich Allemagne	
STETTEN Lucie	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LT2S	70
SUARD Sylvain	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	
SWAIDAN Ali	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	46
TACK Karine	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	
TAMPON Benjamin	IRSN/PRP-HOM/SDE/LMDN	75
TAMPONNET Christian	IRSN/DG	
TANG Nicolas	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	113
TAV Jackie	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LEREN	68
THOMAS Jessica	Université d'Aachen & PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	103
THOMAS Dominique	LRGP, Université de Lorraine	
THOMPSON Patsy-Ann	Canadian Nuclear Safety	
TILLARD Léa	IRSN/PSN-EXP/SNC/LNC	130
TKATCHENKO Nicolas	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	73
TREGLIA Guy	CINaM - Université Aix Marseille	
TREGOURES Nicolas	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
TRIJAU Marie	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	24
VAUQUELIN Olivier	Université Aix Marseille, Laboratoire IUSTI	
VAUX Samuel	IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE	
VIAL Eric	IRSN/PRP-CRI	
VILLAGRASA Carmen	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	
VILLARREAL LARRAURI Alejandro	IRSN/PSN-RES/SAG/LEPC	123
VINCENT Pierre-Guy	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
VIROT François	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
WITTEBROODT Charles	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	
YU Catherine	IRSN/PRP-DGE/SRTG/LETIS	12
ZOU Zhenhai	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	129

## 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

**PSN - RES/SAG** : Service des Accidents Graves

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

**LEPC** : Laboratoire d'Étude de la Physique du Corium

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

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

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

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

**LPMA** : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

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

**LEF** : Laboratoire d'Expérimentation des Feux

**LIE** : Laboratoire de l'Incendie et des Explosions

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

**LIMAR** : Laboratoire Incertitude et Modélisation des Accidents de Refroidissement

**LPTM** : Laboratoire de Physique et de Thermomécanique des Matériaux

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

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

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

**LNR** : Laboratoire de Neutronique des Réacteurs

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

**BEGC** : Service d'Expertise des équipements et des Structures

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

**PRP : Pôle Radioprotection, environnement, déchets et crise**

**PRP - HOM** : Thématique *Protection de l'Homme*

**PRP - HOM / SRBE** : Service de RadioBiologie et d'Epidémiologie

**L3R** : Laboratoire de Recherche en Radiobiologie et Radiopathologie

**LDB** : Laboratoire Dosimétrie Biologique

**LEPID** : Laboratoire d'EPIDémiologie des rayonnements ionisants

**LR2I** : Laboratoire de recherche en régénération des tissus sains irradiés

**LRTOX** : Laboratoire RadioTOXicologie expérimentale

**PRP - HOM / SDE** : Service de Dosimétrie Externe

**LDRI** : Laboratoire de Dosimétrie des Rayonnements Ionisants

**LMDN** : Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie Neutrons

**PRP - HOM / SDI** : Service de Dosimétrie Interne

**LEDI** : Laboratoire d'Evaluation de la Dose Interne

**PRP - ENV** : Thématique *Environnement*

**PRP - ENV / SERIS** : Service de recherche et d'Expertise sur les Risques environnementaux

**L2BT** : Laboratoire de Biogéochimie, Biodisponibilité et Transferts des radionucléides

**LECO** : Laboratoire d'ECOTOxicologie des radionucléides

**LRC** : Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville

**LRTE** : Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans l'environnement

**PRP - ENV / SESURE** : Service d'Étude et de SURveillance de la Radioactivité dans l'Environnement

**LEREN** : Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité dans l'environnement

**PRP - DGE** : Thématique *Déchets et Géosphère*

**PRP - DGE / SRTG** : Service de Recherche sur les Transferts dans la Géosphère

**LETIS** : Laboratoire d'Étude et de recherche sur les Transferts et les Interactions dans les Sous-sols

**LT2S** : Laboratoire d'Études des Transferts en Sub-Surface

**PRP - DGE / SCAN** : Service de Caractérisation des sites et des Aléas Naturels

**BEHRIG** : Bureau d'expertise hydrogéologique

**BERSSIN** : Bureau d'Evaluation des Risques Sismiques pour la Sûreté des INstallations

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

Réalisation du livret 2017 : Véronique Laget.