

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

du 22 au 24 mars

**Journées
des thèses
2016**
Le Croisic



DIRECTION DE LA STRATÉGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DES PARTENARIATS

Journées des thèses Le Croisic, 2016

› › › 22 mars - 24 mars

Programme

➤ Lundi 21 mars

- Accueil à partir de 17 h 00
- Apéritif - Dîner à partir de 19 h 30

➤ Mardi 22 mars 2016 - matinée**08 h 20 ➤ OUVERTURE DES JOURNÉES THÈSES**

Jacques REPUSSARD (Directeur général) et Dominique LE GULUDEC (Présidente)

08 h 45 ➤ SESSION PLÉNIÈRE**Radioprotection de l'homme - Moyens expérimentaux & mesure de la dose**

Jocelyne AIGUEPERSE, (Directrice de la radioprotection de l'homme).
Les moyens expérimentaux au sein de la direction de la radioprotection de l'homme.

Sylvain MEYLAN, Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radioinduits précoces dans des cellules exposées à des irradiations d'ions légers (proton, alpha et carbone).

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

Anthony BONFRATE, Doses secondaires aux tissus sains en protonthérapie : évaluation de la dose à proximité du champ de traitement et étude de l'influence des paramètres d'irradiation.

10 h 30 ➤ Pause**10 h 50 ➤ SESSION PLÉNIÈRE****Métrologie & transferts des radionucléides dans l'environnement**

Jean-Christophe GARIEL, (Directeur de la protection de l'environnement). Les moyens expérimentaux au sein de la direction de la radioprotection de l'homme.

Hugues PARADIS, Développement d'un système de détection d'émetteurs gamma en coïncidence.

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

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

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

13 h 00 ➤ Déjeuner

► Mardi 22 mars 2016 - après-midi

14 h 30 ► SESSION POSTER

16 h 00 ► SESSION PLÉNIÈRE

Recherches en sûreté & comportement du combustible en situation accidentelle**Richard GONZALEZ** (Adjoint au directeur de la recherche en sûreté).

Les plates-formes expérimentales de la sûreté.

Adrien ABBATE, Simulation expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide.**Yixian ZHOU**, Ejection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire : modélisation de la dynamique.**Lola SARRASIN**, Mécanisme d'incorporation et de migration du molybdène dans le dioxyde d'uranium stœchiométrique et sur-stœchiométrique.

17 h 35 ► Pause

17 h 50 ► SESSION PARALLÈLE

Systèmes et équipements de confinement & réactivité des aérosols**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.**Ankita JADON**, Interactions entre radionucléides et aérosols de sodium formés lors d'un accident dans un réacteur nucléaire refroidi au sodium.

17 h 50 ► SESSION PARALLÈLE

Transferts des radionucléides dans l'environnement**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.**Hugo RENARD**, Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium au sein d'un écosystème prairial : caractérisation des flux et analyse de sensibilité.**Huong Liên NGUYEN**, Evolution de la contamination en radionucléides de la zone d'exclusion de Tchernobyl : de la tranchée T22 à l'échelle du bassin versant.**Mohamed Amine CHERIF**, Modélisation dynamique de la (bio)disponibilité des éléments chimiques dans les sols : approche comparative modèles-expériences appliquée au transfert de strontium et de césium dans la ZNS.

20 h 15 ► Dîner

➤ Mercredi 23 mars - matinée**08 h 30 ➤ SESSION PLÉNIÈRE****L'aléa sismique et sa prise en compte en sûreté**

Oona SCOTTI, L'étude de l'aléa sismique à l'IRSN : une expertise nourrie par la recherche.

Elif ORAL, Modélisation de la propagation des ondes sismiques en 3D dans des milieux linéaire et non-linéaire.

Vincent PERRON, Evaluation empirique des effets de site : développement d'une méthodologie adaptée aux zones de faibles sismicités.

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

10 h 10 ➤ Pause**10 h 25 ➤ SESSION PARALLÈLE****Pathologies induites par les rayonnements et stratégies thérapeutiques ; approches épidémiologiques**

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

Cyprien JAILLET, Modifications radio-induites du glycome des protéines membranaires endothéliales : implications sur le recrutement des cellules circulantes et sur la thrombose vasculaire dans le tissu irradié.

Benoît USUNIER, Biothérapie du traitement des effets secondaires de la radiothérapie ; étude préclinique du traitement des effets secondaires des radiothérapies abdomino-pelvienne par les Cellules Souches Mésenchymateuses chez le rat Sprague-Dawley dans un modèle d'irradiation fractionnée pelvienne.

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.

10 h 25 > SESSION PARALLÈLE

Viellissement des installations & méthodes d'interpolation

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.

Lionel BICHET, Prise en compte des mécanismes de transports dans la fissuration des matériaux hétérogènes: application à la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires.

Ahmedou SIDI, Etude de la dégradation de polymères constitutifs de câbles contrôle commande en ambiance 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.

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.

13 h 00 > Déjeuner

> Mercredi 23 mars - après-midi

14 h 20 > SESSION POSTER

15 h 30 > SESSION PARALLÈLE

Stockage des déchets

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

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

Philippines LALAN, Impact de la température sur la géochimie et la diffusion aux interfaces béton/argile dans le stockage des déchets radioactifs.

Sophie GROUSSET, Mécanismes de corrosion sur le long terme en milieux anoxiques - étude physico-chimique des phases soufrées à travers une approche triple: analogues archéologiques, essais *in situ* à la SET et essais en laboratoire.

15 h 30 > SESSION PARALLÈLE

Explosion et incendie dans les installations nucléaires

David ALIBERT, Etude 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.

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

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

Miriam D'AMICO, Etude expérimentale et modélisation des explosions hybrides solides/solides : application au cas des mélanges de poussières graphite/métaux.

17 h 10 > Pause

17 h 35 > SESSION PARALLÈLE

Effet des faibles doses chez les organismes vivants

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

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

Laure GENIES, Etude des transporteurs impliqués dans l'absorption racinaire et la translocation aux parties aériennes du césium chez *Arabidopsis thaliana*.

Yvan EB-LEVADOUX, Identification des ligands biologiques de l'uranium dans les gonades de *Danio rerio* - Impact sur leur fonctionnalité.

17 h 35 > SESSION PARALLÈLE

Rejets dans le réacteur en situation accidentelle & piégeage des aérosols

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

Dorel OBADA, Evaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un réacteur à eau pressurisée : étude expérimentale de la revolatilisation de dépôts de produits de fission (Cs, I, Ru).

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

Charlène MOULIN, Etude du piégeage des iodes radioactifs (I2 et ICH3) par des adsorbants poreux dans différentes conditions de fonctionnement.

19 h 45 > Dîner

21 h 00 > Soirée AD'I[N] «Couvre-chef.»

➤ Jeudi 24 mars - matinée

09 h 20 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

Facteurs humains et organisationnels

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

Sylvie THELLIER, La sécurité en radiothérapie : coopération entre les acteurs de la prescription et de l'application.

10 h 00 ➤ Pause

10 h 15 ➤ SESSION PLÉNIÈRE

Accidents graves

Paul-Martin STEFFEN, Investigation of the operational behaviour of a passive auto-catalytic recombiner under the extreme accident conditions inside the ITER fusion facility.

Faoulat MIRADJI, Modélisation du comportement du ruthénium lors de son transport dans le circuit primaire.

Ali SWAIDAN, Ecoulement diphasique dans un milieu à porosité évolutive.

Ange GOURBIL, Caractérisation d'un écoulement diphasique dans un milieu poreux modèle.

11 h 50 ➤ CLÔTURE DES JOURNÉES THÈSES

Matthieu SCHULER,

Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats (DSDP).

12 h 30 ➤ Départ aéroport de Nantes.

12 h 30 ➤ Déjeuner

SESSION POSTERS

Doctorants de 1^{ère} année et post-doctorants

Pôle radioprotection : Dosimétrie, Epidémiologie, Radiobiologie, Sismologie,
Risques environnementaux, Transferts dans la géosphère

Sessions le mardi à 14 h 30 et le mercredi à 14 h 20
(résumés pages 130 à 158)

- **Caroline ARCANJO**, Etude des effets des rayonnements ionisants (irradiation gamma, tritium) sur le poisson zèbre, *Danio rerio*, par des approches *in vitro* et *in vivo* - caractérisation des modes d'action.
- **Tiffany BEAUMONT**, Impression 3D de fantômes et utilisation en dosimétrie.
- **Ségolène BOUET RIVOAL**, Analyses des risques de pathologies cancéreuses et non cancéreuses au sein d'une cohorte de travailleurs surveillés pour contamination interne.
- **Thomas FERRACCI**, Modélisation de la charge en suspension des cours d'eau pour l'évaluation des flux de radionucléides.
- **Amelie FRENEAU**, Etude de la signalisation et du devenir des dommages initiaux induits par un rayonnement X de basse énergie : comparaison avec un rayonnement X de référence.
- **Stéphane GRISON**, Etude des effets biologiques de l'uranium dans le cadre d'une exposition multigénérationnelle chez le rat par approche métabolomique.
- **Eric LASCAR**, Comportement du radium et de ses ascendants radioactifs dans les sols et transfert dans les végétaux terrestres.
- **Dalila LEBSIR**, Toxicologie de l'iode stable : Etude *in vivo* des effets biologiques associés à une prophylaxie répétée par l'iode stable.
- **Pierre-Emmanuel OMS**, Transferts multi-échelles des apports continentaux sur le plateau du golfe de Gascogne.
- **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.
- **Alexandre RIBAUT**, Effet thérapeutique des exosomes pour le traitement des lésions radio-induites musculo-cutanées.
- **Marine ROULIER**, Cycle biogéochimique de l'iode dans les écosystèmes forestiers.
- **Frédéric SOYSOUVANH**, Sénescence endothéliale radio-induite et conséquences sur les lésions radiques aux tissus sains.
- **Lucie STETTEN**, Comportement de l'uranium dans les sédiments lacustres en aval d'anciens sites miniers uranifères : mesures spectroscopiques et modélisation géochimique.
- **Benjamin TAMPON**, Qualification de la p-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).
- **Nicolas TKATCHENKO**, Développement de l'utilisation de la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique sur les phanères pour la dosimétrie d'accident radiologique.

**Pôle sûreté : Combustible, Matériaux, Incendie, Méthodes, Aérosols et filtration,
Facteurs humains et organisationnels**

**Sessions le mardi à 14 h 30 et le mercredi à 14 h 20
(résumés pages 159 à 186)**

- **Mohamed BELERAJOU**, Modélisation multi-échelle de la combustion d'un nuage de particules.
- **Roberto CARUSO**, Analyse de propagation de flamme hydrogène-air-vapeur en présence de gouttes d'eau.
- **Paul EYMEOD**, Modélisation atomistique de la fragilisation des gainages combustibles nucléaires par les hydrures.
- **Camille FORTIN**, Modélisation des interactions entre l'iode et les aérosols dans l'atmosphère.
- **Kasi GAJAVALLI**, Description thermodynamique des phases dans le ternaire Ag-In-Zr, en particulier à haute température, sur la base d'expériences.
- **Mathilde GESTIN**, 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.
- **Ismail GOURRI**, Analyse socio-historique de choix controversés en matière de dispositions de sûreté sur les INB françaises.
- **Romain HANOZET**, Effets de pentes sur la propagation et le contrôle de fumées dans les galeries souterraines : application à la maîtrise du risque incendie dans le projet de centre de stockage Cigéo.
- **Vaibhav JAISWAL**, Etude expérimentale des sections efficaces de diffusion de l'eau légère en spectre thermique, de leur dépendance en température et quantification des incertitudes associées.
- **Louis JOÉSSEL**, Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal poreux : application à un acier inoxydable austénitique irradié.
- **Laura LINTIS**, Etude des mécanismes de sorption de l'eau sur des aérosols émis lors d'incendies : identification des paramètres physico-chimiques d'influence.
- **Thi Phuong Anh MAC**, Développement d'outils d'aide au diagnostic et au pronostic en contexte d'accident nucléaire grave.
- **Maxime MENSE**, Etude expérimentale et théorique des régimes d'instabilité de combustion à basse fréquence lors d'un incendie dans une enceinte mécaniquement ventilée.
- **Juan David PENA CARRILLO**, Etude expérimentale du transfert paroi/fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire.
- **Oussama RABOUN**, Structuration de l'expertise par une analyse mathématique décisionnelle : application à la pollution maritime accidentelle.
- **Adithya RAMANATHAN KRISHNAN**, Etude expérimentale et numérique par approche RANS et LES d'écoulements stratifiés.
- **Valentin SCHEIFF**, Ebullition transitoire : modélisation du transfert de chaleur.

➤ **Mardi 22 mars**

08h20

Amphithéâtre Queen Mary II

ACCUEIL

Jacques REPUSSARD (Directeur général)

Dominique LE GULUDEC (Présidente)

SESSION PLÉNIÈRE

Radioprotection de l'homme

Moyens expérimentaux & mesure de la dose

Président : Jean-Marc LOBACCARO,

Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand.

Unité Génétique, reproduction et environnement.

Jocelyne AIGUEPERSE, (Directrice de la radioprotection de l'homme). Les moyens expérimentaux au sein de la direction de la radioprotection de l'homme.

Sylvain MEYLAN, Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radioinduits précoces dans des cellules exposées à des irradiations d'ions légers (proton, alpha et carbone).

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

Anthony BONFRATE, Doses secondaires aux tissus sains en protonthérapie : évaluation de la dose à proximité du champ de traitement et étude de l'influence des paramètres d'irradiation.

Sujet de la thèse :

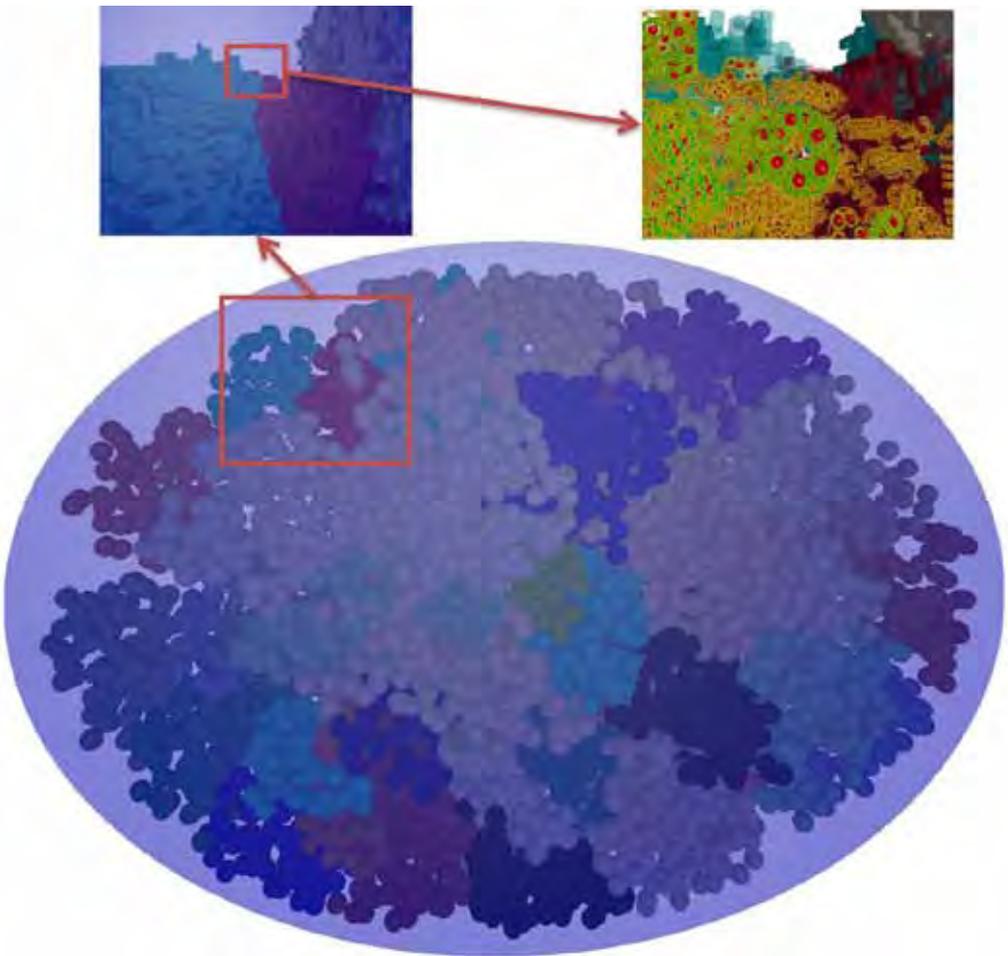
Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radioinduits précoces dans des cellules exposées à des irradiations d'ions légers (proton, alpha et carbone)

Doctorant :	Sylvain MEYLAN
Date du début de la thèse :	01/10/13
Laboratoire :	PRP- HOM/SDE/LDRI
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Sébastien Incerti, IN2P3 - CENBG
Tuteur de thèse :	Carmen Villagrasa
Ecole doctorale :	Bordeaux - Sciences physiques et de l'ingénieur - ED 209

Les dommages radio-induits à l'ADN sont aujourd'hui identifiés comme une des causes de la mort cellulaire. Cependant, l'établissement d'une corrélation quantitative entre les dépôts d'énergie, les dommages initiaux générés et leurs conséquences biologiques est un champ de recherche toujours actif. Dans ce cadre, des codes de calcul Monte Carlo de structure de traces sont utilisés afin de simuler les dépôts d'énergie initiaux (étape physique) ainsi que, pour certains d'entre eux, les étapes physico-chimique et chimique suivant l'étape physique. C'est lors des étapes physico-chimique et chimique que des radicaux sont créés et, parfois, attaquent chimiquement les molécules d'ADN. Dans leur grande majorité, ces codes de Monte Carlo considèrent l'ensemble du noyau cellulaire comme un milieu homogène constitué d'eau liquide et contenant une structure géométrique représentant la molécule d'ADN.

L'objectif de ce travail de thèse est d'améliorer la simulation des dommages initiaux en introduisant dans le code Geant4-DNA la composition réelle de l'ADN, à travers l'ajout de sections efficaces de l'ADN récemment mesurées, ainsi qu'une géométrie de l'ADN détaillée jusqu'au niveau moléculaire. Les résultats de la simulation sont ensuite comparés aux données biologiques expérimentales obtenues par le groupe du LDB (IRSN) après irradiations de cellules. Ces irradiations sont effectuées avec un microfaisceau pour avoir une connaissance exacte du nombre de traces traversant le noyau cellulaire. Le modèle géométrique d'ADN, précédemment constitué d'une unique fibre de chromatine (18 kBp), a été récemment étendu pour représenter un génome humain complet (~6 GBp). Pour cela, un nouvel outil permettant de créer, modifier et visualiser de grandes quantités d'ADN a été mis en place : DnaFabric.

Les premières simulations des étapes physique, physico-chimique et chimique avec cette géométrie ont permis de calculer un nombre moyen de cassures ADN par particule incidente (trace) qui peut être comparé aux résultats biologiques. Les résultats préliminaires montrent une surestimation du nombre de cassures calculées par la simulation. Néanmoins, les paramètres et critères utilisés actuellement pour simuler les cassures sont peu contraignants et des études sont actuellement en cours afin de les raffiner, ce qui aurait tendance à diminuer le nombre de cassures simulées.



Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Nadia BENABDALLAH
Date du début de la thèse :	15/09/2014
Laboratoire :	PRP- HOM/SDI/LEDI
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Didier Franck, IRSN
Tuteur de thèse :	Aurélie Desbrée
Ecole doctorale :	PHENIICS, Paris-Saclay

La médecine nucléaire thérapeutique repose sur l'administration d'un radiopharmaceutique, qui va se distribuer dans le corps du patient et se fixer plus spécifiquement dans les régions tumorales afin de les détruire. Parmi ces radiopharmaceutiques, les émetteurs alpha sont actuellement en plein essor : ils ont l'avantage par rapport aux émetteurs beta- de délivrer une plus grande quantité d'énergie sur un faible parcours. Ces propriétés leur confèrent donc une plus grande cytotoxicité sur les cellules tumorales tout en limitant l'irradiation aux tissus sains.

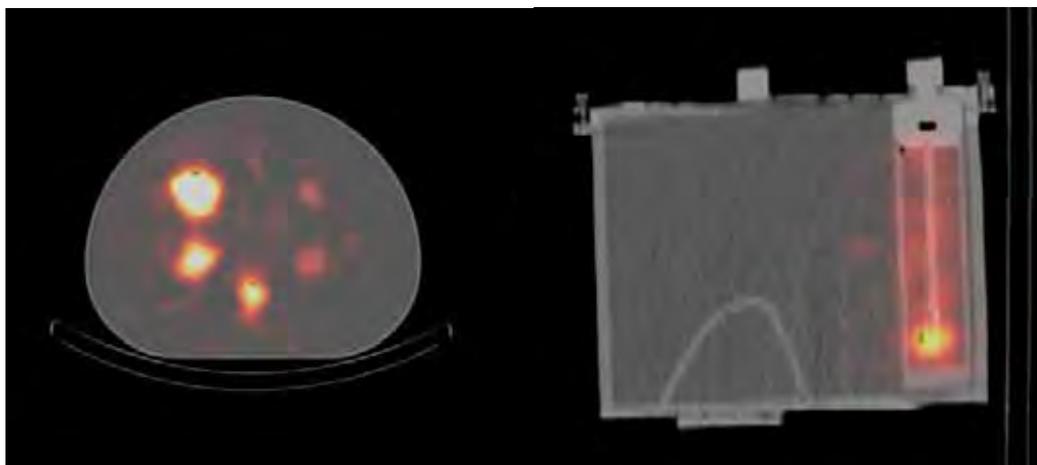
Le Xofigo® ($^{223}\text{RaCl}_2$) est le premier à avoir obtenu l'autorisation de mise sur le marché pour le traitement de patients atteints de métastases osseuses prostatiques. Il est actuellement l'objet d'un essai clinique pour les métastases osseuses après un carcinome rénal.

Compte tenu des challenges posés par l'arrivée de ces nouveaux radiopharmaceutiques en thérapie, il est apparu nécessaire d'optimiser la dosimétrie du patient. Pour cela, la distribution spatiale et temporelle du radiopharmaceutique dans le corps du patient doit être connue.

Le premier challenge consiste alors à déterminer un protocole d'acquisition pour obtenir une image quantitative optimale d'un émetteur alpha avec une gamma-caméra. En collaboration avec l'Hôpital Européen Georges Pompidou, des expériences ont ainsi été mises en place pour caractériser, dans un premier temps, les paramètres de la gamma-caméra en mesurant le spectre en énergie, la résolution spatiale et la sensibilité. Ensuite, un fantôme NEMA et un fantôme anthropomorphe TORSO ont été utilisés pour étudier, pour la première fois, les possibilités d'une imagerie TEMP (Tomographie d'Emission MonoPhotonique).

Le deuxième challenge est de prendre en compte l'évolution temporelle du radiopharmaceutique à partir d'images à différents temps. Pour répondre à cela, un module de modélisation de la biocinétique a été intégré à notre logiciel de dosimétrie interne: OEDIPE. Ce module a été testé et validé sur des images de souris injectées au ^{18}F -FDG.

Tous ces résultats seront précieux pour réaliser une étude dosimétrique à partir des images patient. Cependant, au vu du faible parcours des particules alpha, l'irradiation des cellules cibles peut-être fortement hétérogène. Une approche microscopique sera donc envisagée.



*Images TEMP de ^{223}Ra (en rouge)
Coupe axiale fusionnée avec les images scanner du fantôme NEMA (à gauche)
et coupe coronale fusionnée avec les images scanner du fantôme TORSO (à droite).*

Sujet de la thèse :

Développement d'un modèle analytique pour l'estimation des doses dues aux neutrons aux organes sains en protonthérapie et étude des différentes particules secondaires

Doctorant :	Anthony BONFRATE
Date du début de la thèse :	07/10/2013
Laboratoire :	PRP - HOM/SDE/LDRI
Financement de thèse :	Cofinancement IRSN - Institut Curie Centre de Protonthérapie d'Orsay
Directeur de thèse :	Joël Héroult - Centre Antoine Lacassagne (Nice)
Tuteur de thèse :	Jad Farah
Ecole doctorale :	Université Paris-Saclay - PHENIICS

Lors d'un traitement par protonthérapie, des neutrons sont générés par l'interaction des protons avec les éléments présents dans la ligne de traitement et le patient lui-même. Ils déposent ainsi une dose non désirée aux organes sains (OS) en dehors du champ de traitement. Les simulations Monte Carlo étant longues et incompatibles pour une utilisation en routine clinique, un modèle analytique capable d'estimer de manière rapide et fiable ces doses neutroniques a été développé.

En simulant un traitement intracrânien à un patient féminin de 10 ans avec le code de calcul MCNPX, les doses neutroniques aux OS ont été obtenues en faisant varier individuellement de façon réaliste l'énergie de traitement, la largeur de modulation, l'ouverture du collimateur, etc. Ensuite, les fonctions mathématiques reproduisant les variations de dose en fonction de chaque paramètre d'irradiation ont été déterminées. Le modèle analytique a ainsi été développé en regroupant ces fonctions mathématiques avec deux paramètres choisis car ils sont accessibles en routine clinique : le nombre de protons mesurés dans la ligne de traitement et la distance entre le collimateur final et les OS.

Lors de l'évaluation des paramètres du modèle, les valeurs de doses neutroniques obtenues par simulation numérique pour 18 configurations de traitement et utilisées comme données d'apprentissage ont été estimées à $\pm 20\%$ pour la majorité des organes ; l'écart peut atteindre $\pm 45\%$ pour les organes loin du volume cible comme la vessie mais reste inférieur à $50 \mu\text{Gy Gy}^{-1}$. De tels écarts restent acceptables compte tenu de l'incertitude des simulations (géométrie, modèles nucléaires, etc.) et de l'écart final sur les doses équivalentes de $\pm 20 \text{ mSv}$. Les performances du modèle analytique ont ensuite été testées pour des configurations non considérées dans l'apprentissage, notamment pour d'autres âges de patient. Les écarts sont de $\pm 35\%$ pour la majorité des organes et peuvent atteindre $\pm 100\%$ pour les organes à distance du volume cible recevant les doses les plus faibles. Ils restent cependant inférieurs à $50 \mu\text{Gy Gy}^{-1}$ (cf. fig.1).

Des validations supplémentaires sont prévues pour les lignes à basse énergie du CPO et du Centre Antoine Lacassagne de Nice pour s'orienter vers un modèle analytique universel.

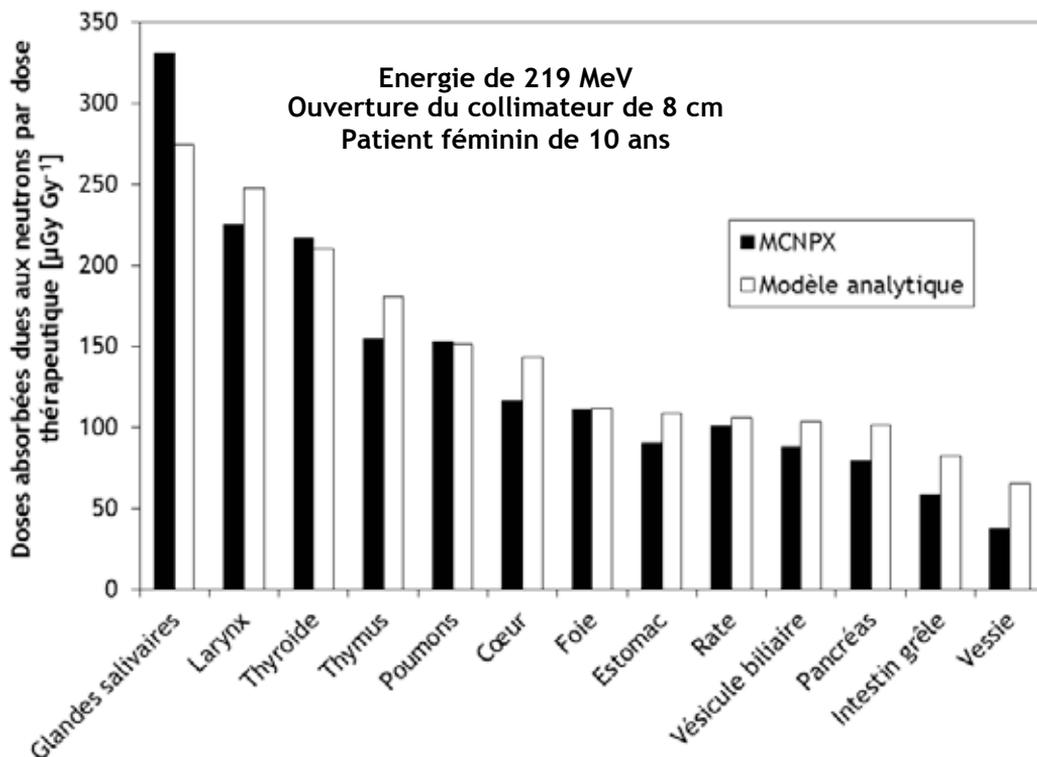


Figure 1. Comparaison entre les doses dues aux neutrons normalisées par dose thérapeutique [$\mu\text{Gy Gy}^{-1}$] calculées avec MCNPX et celles estimées avec le modèle analytique pour une configuration arbitraire non considérée dans l'apprentissage. Les organes sont rangés par ordre croissant selon leur distance au volume cible (cerveau)

➤ Mardi 22 mars

10h50

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PLÉNIÈRE

Météologie & transferts des radionucléides dans l'environnement

Président : Jean-Christophe SABROUX,
Expert senior.
Service de confinement des aérosols (PSN - RES/SCA).

Jean-Christophe GARIEL,
(Directeur de la protection de l'environnement).
Les moyens expérimentaux au sein de la direction
de la radioprotection de l'homme.

Hugues PARADIS, Développement d'un système de détection
d'émetteurs gamma en coïncidence.

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

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

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 :

Développement d'un système de mesure par spectrométrie gamma en coïncidence

Doctorant :	Hugues PARADIS
Date du début de la thèse :	01/10/2013
Laboratoire :	PRP - ENV/STEME/LMRE
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Fabrice Piquemal - CENBG
Tuteur de thèse :	Anne de Vismes Ott
Ecole doctorale :	PHENIICS / Paris Sud XI

Dans le cadre de la surveillance radiologique de l'environnement, le Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (LMRE) réalise des mesures d'activité dans différentes matrices environnementales. Il s'agit de matrices biologiques, de sols, d'eaux ou encore de filtres de prélèvement d'aérosols. La diminution constante des activités massiques des radionucléides artificiels dans l'environnement implique une amélioration continue des moyens et méthodes de mesure.

La spectrométrie γ en coïncidence est une méthode de mesure basée sur l'émission en coïncidence, qui a lieu lorsqu'un radionucléide se désintègre en émettant au moins deux photons en cascade dans un intervalle de temps très court. La détection se fait à l'aide de deux détecteurs, chaque photon étant détecté par un des deux détecteurs. La matrice de coïncidence (Figure 1) permet d'identifier les émetteurs en coïncidence grâce à des empreintes caractéristiques obtenues lorsque les deux photons en coïncidence déposent la totalité de leur énergie dans chacun des deux détecteurs.

Le travail de thèse s'articule autour du développement de la méthode de mesure en coïncidence, avec l'écriture d'un algorithme d'analyse et de son application à deux systèmes de mesure. Le premier, déjà existant au laboratoire, est un système anti-Compton composé d'un spectromètre germanium (Ge) entouré d'un scintillateur NaI(Tl). Le second système, appelé Léda, a été conçu par simulation et installé dans la salle blindée du laboratoire. Il est composé de deux spectromètres Ge face à face entourés d'un scintillateur NaI(Tl). L'algorithme d'analyse va lire les fichiers en mode liste fournis par les électroniques numériques des systèmes. Toutes les informations en temps et en énergie pour chaque événement sont enregistrées dans ce fichier en mode liste.

La méthode de mesure par spectrométrie γ en coïncidence est juste, plus précise et plus sensible que la spectrométrie γ classique. Les mesures sur le système anti-Compton ont montré une amélioration d'un facteur 10 des limites de détection pour le ^{60}Co . Léda a été développé pour réaliser des coïncidences entre les deux Ge et ainsi mesurer tous les radionucléides émetteurs en coïncidence. Le scintillateur NaI(Tl) permet également de réaliser des mesures en anti-coïncidence pour les émetteurs simples, ce qui en fait un système polyvalent. Les mesures sur Léda ont montré des améliorations des limites de détection d'un facteur 3 à 10 sur la mesure du ^{137}Cs en anti-coïncidence et d'un facteur 2 à 15 pour les émetteurs en coïncidence suivants :

^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{134}Cs .

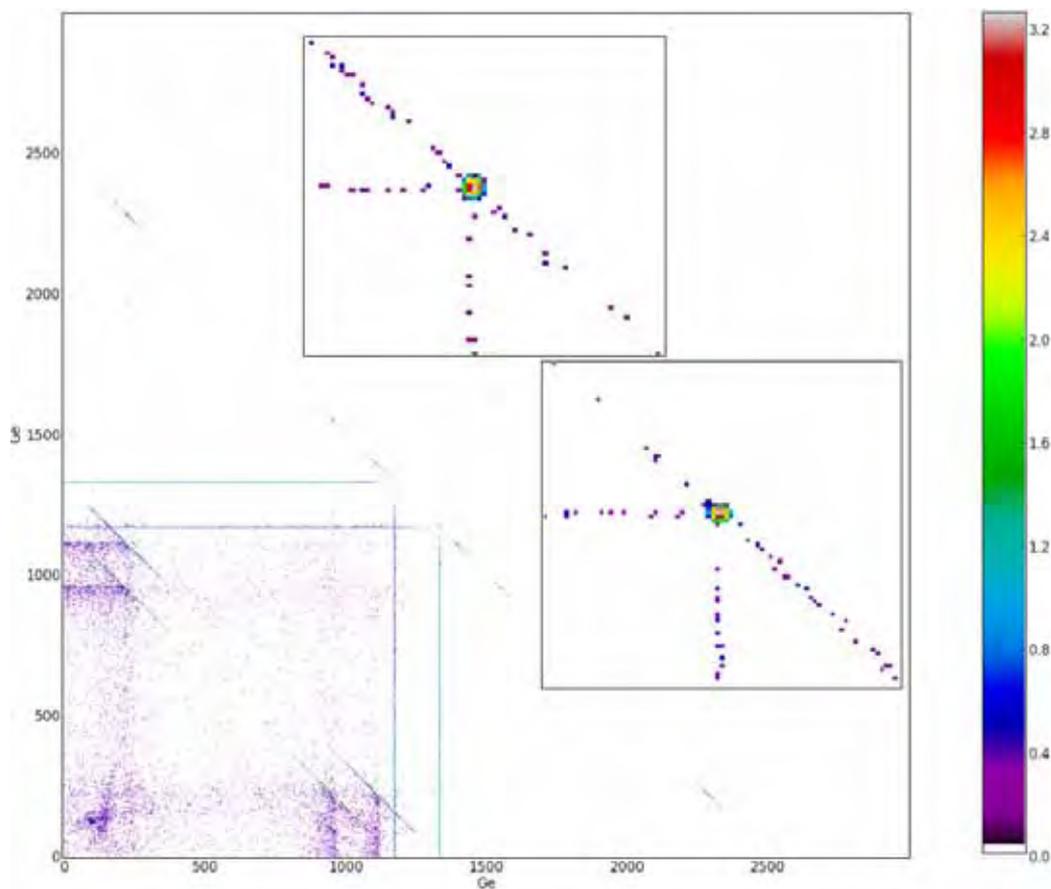


Figure 1. Matrice de coïncidence du ^{60}Co

Sujet de la thèse :

Etude du dépôt par les nuages et les brouillards de radionucléides sur les végétaux

Docteurant :	Jackie TAV
Date du début de la thèse :	13/10/2014
Laboratoire :	PRP - ENV/SESURE/LEREN
Financement de thèse :	IRSN/Météo-France - CNRM
Directeur de thèse :	Laurent Pourcelot
Tuteur de thèse :	Olivier Masson (IRSN)/Frédéric Burnet (CNRM)
Ecole doctorale :	Université de Toulouse - SDU2E - ED 173

Après un accident nucléaire, de larges quantités de radionucléides sont rejetées sous forme de gaz et d'aérosols dans l'atmosphère. Les aérosols produits peuvent alors servir de support de condensation pour la formation de gouttelettes de brouillard pouvant à leur tour se déposer sur les végétaux et contribuer à leur contamination.

L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel de dépôt de radionucléides lié à la présence de brouillard et de nuage sur des végétaux présentant des surfaces différentes en termes d'impaction ou de captation des gouttelettes en suspension. La collecte de l'eau de brouillard et la quantification de la masse d'eau déposée sur les plantes sont effectuées à la plateforme atmosphérique de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement de l'ANDRA à Houdelaincourt (région Nord-Est). Afin de mesurer la masse d'eau déposée sur les plantes, trois types de végétaux (choux, graminées et petits conifères) sont exposés au brouillard et pesés à intervalles réguliers grâce à une balance de précision.

Les résultats obtenus sur différents épisodes entre octobre 2014 et février 2015, montrent que la quantité d'eau déposée sur une surface nue par les brouillards représente moins d'1% du cumul des pluies sur la même période (404 L.m^{-2}). La présence de végétation augmente considérablement le dépôt des gouttelettes de brouillard pour une même surface au sol. Ce dépôt est par exemple multiplié par 4 en présence de petits conifères. La collecte d'échantillons d'eau de brouillard durant l'automne 2014



Un collecteur d'eau de brouillard développé au sein du LEREN, inspiré du Caltech Active Strand Cloudwater Collector (CASCC) de l'Université Caltech

et l'hiver 2015 permet de déterminer une activité moyenne en ^{137}Cs proche de 1 mBq.L^{-1} . L'activité moyenne pour la même période dans l'eau de pluie est de 0.05 mBq.L^{-1} . L'eau de brouillard est donc 20 fois plus concentrée en ^{137}Cs que l'eau de pluie. En terme de dépôt surfacique, les gouttelettes de brouillard représentent donc plus de 10% du dépôt humide de ^{137}Cs entre octobre 2014 et février 2015 à Houdelaincourt.

Les quantités d'eau déposée par les brouillards sont minimales par rapport à celles déposées par les précipitations mais les quantités de radionucléides déposées par les gouttelettes de brouillard sont elles non négligeables, de par la plus forte concentration en radionucléides de l'eau de brouillard.

Sujet de la thèse :

**Quantification des vitesses de dépôts secs et identification des processus d'émissions
des aérosols sur couvert naturel**

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

Lors de rejets chroniques ou accidentels, des aérosols radioactifs peuvent être émis par les installations puis être soumis aux processus de dispersion atmosphérique et de dépôts par temps sec et par temps humide. Après dépôt, ces aérosols radioactifs peuvent être remis en suspension par des processus principalement éoliens. Des incertitudes, pouvant aller jusqu'à plusieurs ordres de grandeurs, existent sur les processus de dépôts 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 dépôts secs des aérosols sur couvert naturel pour une gamme granulométrique 2,5 nm - 10 μm (majorité des particules atmosphériques susceptibles de véhiculer des radionucléides). En effet, dans cette gamme, aucune donnée n'est disponible alors qu'elle correspond, par exemple, à la taille de particules que pourrait avoir ^{131}I ou ^{106}Ru émis en cas d'accident. La vitesse de dépôt correspond au rapport entre le flux de particules et leur concentration moyenne à une hauteur donnée. Par ailleurs, les vitesses de dépôt seront quantifiées en fonction de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique et thermique.

Le second objectif est l'identification des processus de remise en suspension de particules primaires et secondaires. Les particules primaires sont émises directement vers l'atmosphère et peuvent être inertes ou vivantes (bioaérosols). Les bioaérosols seraient susceptibles de véhiculer différents radionucléides tels que le tritium ou le ^{14}C . Les particules secondaires sont issues de diverses réactions au sein de l'atmosphère comme par exemple la conversion de gaz en particules.

Pour répondre à ces objectifs, deux campagnes de prélèvements et mesures de 10 jours ont été réalisées en avril et septembre 2015 sur une prairie du site INRA de Lusignan, près de Poitiers. Des mesures de vitesses de dépôts secs par Eddy Correlation ont été effectuées pour la gamme granulométrique 2,5-14 nm (utilisation de deux compteurs CNC) et 7 nm-10 μm (utilisation d'un granulomètre ELPI). La méthode du gradient avec deux bioimpacteurs Andersen 1 étage a été mise en œuvre pour calculer des flux de bioaérosols et un granulomètre SMPS a été utilisé pour observer les épisodes de nucléation des particules secondaires.



Mesure de flux de dépôts sec (Eddy Correlation)

*Observation des
épisodes de nucléation
(SMPS)*

*Mesure de flux de bioaérosols (Méthode du
gradient)*

*Méthodes et moyens déployés pour les mesures de flux verticaux de particules primaires
et secondaires lors de deux campagnes expérimentales en avril et septembre 2015*

Sujet de la thèse :

**Devenir du radium et du thallium aux interfaces nappes/rivières
dans les environnements miniers**

Doctorant :	Loïc Martin
Date du début de la thèse :	01/10/2014
Laboratoire :	IPGP/EGE & PRP - DGE/SRTG/LETIS
Financement de thèse :	IRSN/BRGM/CEA
Directeur de thèse :	Marc Benedetti, IPGP
Tuteur de thèse :	Caroline Simonucci
Ecole doctorale :	IPGP/Ecole Doctorale STEP'UP

Radium (Ra) and thallium (Tl) are potential contaminants in rivers at the vicinity of uranium mining sites. Downstream transport and reactions in the hyporheic zone (pore waters at the interface between river and groundwater) are rarely quantified. In this area, water volumes are small and do not allow the use of common techniques such as emanometry or gamma spectrometry for radium (important volume are necessary). Added to very low concentrations of Ra and Tl (10^{-15} M and 10^{-11} M respectively), it requires the development of a specific *in situ* sampler combined with high sensitivity measurements. This specific probe will be used to measure both concentrations and isotopic ratios (i.e., $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$, $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$).

DGT (Diffusive Gradient in Thin-films) are passive sensors composed of a reactive/adsorption layer and an inert diffusive layer in contact with the aquatic system. Usually Chelex[®] resin is used as the reactive layer which allows retrieving specifically metal concentrations and potentially speciation data in natural waters.

In this work, we developed a new hydrated gel able to preconcentrate Ra and Tl along with a multiwell DGT support in order to sample chemical and isotopic gradients in the hyporheic zone; Ra and Tl concentrations are measured by HR-ICP-MS (element 2, Thermo Scientific).

DGT Ra-Tl calibrations performed with synthetic or natural waters show preconcentration factors > 20. We also developed a 1D, 2D reactive transport model based on COMSOL[®] modules first to study the probe response to transient signals in river and then to define the appropriate diffusive layer thickness.

➤ Mardi 22 mars

16 h 00

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PLÉNIÈRE

Recherches en sûreté & comportement du combustible en situation accidentelle

Présidente : Véronique ROUYER,
Directrice adjointe à la stratégie, au développement
et aux partenariats (DSDP).

Richard GONZALEZ (Adjoint au directeur de la recherche en sûreté). Les plates-formes expérimentales de la sûreté.

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

Yixian ZHOU, Ejection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire : modélisation de la dynamique.

Lola SARRASIN, Mécanisme d'incorporation et de migration du molybdène dans le dioxyde d'uranium stœchiométrique et sur-stœchiométrique.

Sujet de la thèse :

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

Doctorant :	Adrien ABBATE
Date du début de la thèse :	02/07/1990
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LIMAR
Financement de thèse :	co-financement EDF - IRSN
Directeur de thèse :	Philippe Haberschill et Romuald Rullière CETHIL, Lyon
Tuteur de thèse :	Pierre Ruyer
Ecole doctorale :	Université de Lyon/MEGA

Un accident d'insertion de réactivité (RIA, événement à cinétique rapide causé par exemple par l'éjection d'une grappe de commande) dans un cœur nucléaire pourrait provoquer la rupture d'une gaine et l'éjection d'une fine poudre ardente de combustible dans le fluide 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. Cependant, leur réalisation en conditions représentatives d'un REP est complexe (hautes énergies et haute pression) et leur instrumentation est limitée. Ainsi la validation de l'estimation d'une interaction combustible réfrigérant est limitée.

Dans ce contexte, dans ce travail de thèse, on étudie l'utilisation du dioxyde de carbone, dont les propriétés thermodynamiques (pression critique, enthalpie de vaporisation...) réduisent ces contraintes. Néanmoins, afin de transposer les observations d'une expérience utilisant du CO₂, il est indispensable d'étudier les lois de similitudes entre les deux fluides. Cette étude a établi qu'en conservant la pression réduite ainsi que le titre thermodynamique, on obtient des interactions similaires avec des énergies mises en jeu divisées par cinq dans le cas du CO₂. Ceci permet d'envisager la conception d'un banc d'essai pour étudier l'interaction thermique violente au sein d'un fluide.

La conception de ce banc suppose de simuler l'environnement du fluide. Une étude a permis de définir une géométrie d'intérêt pour la cellule d'essai. L'insertion rapide d'énergie au sein du fluide est générée par effet Joule à l'aide d'un filament en tungstène subissant la décharge d'une batterie de condensateurs. Le niveau d'énergie stocké dans les condensateurs ainsi que le diamètre de ce filament pilotent alors le transfert thermique entre le solide et le liquide et la violence de l'interaction. Le schéma ci-contre illustre une réalisation probable du système expérimental.

Cette étude expérimentale permettra d'acquérir des caractérisations locales de l'interaction telles que la pression maximale et la quantité de vapeur formée grâce aux choix d'une instrumentation perfectionnée. Ces mesures seront utilisées pour valider les modèles intégrés dans le logiciel de calcul CIGALON développé par l'IRSN pour estimer la violence d'une interaction.

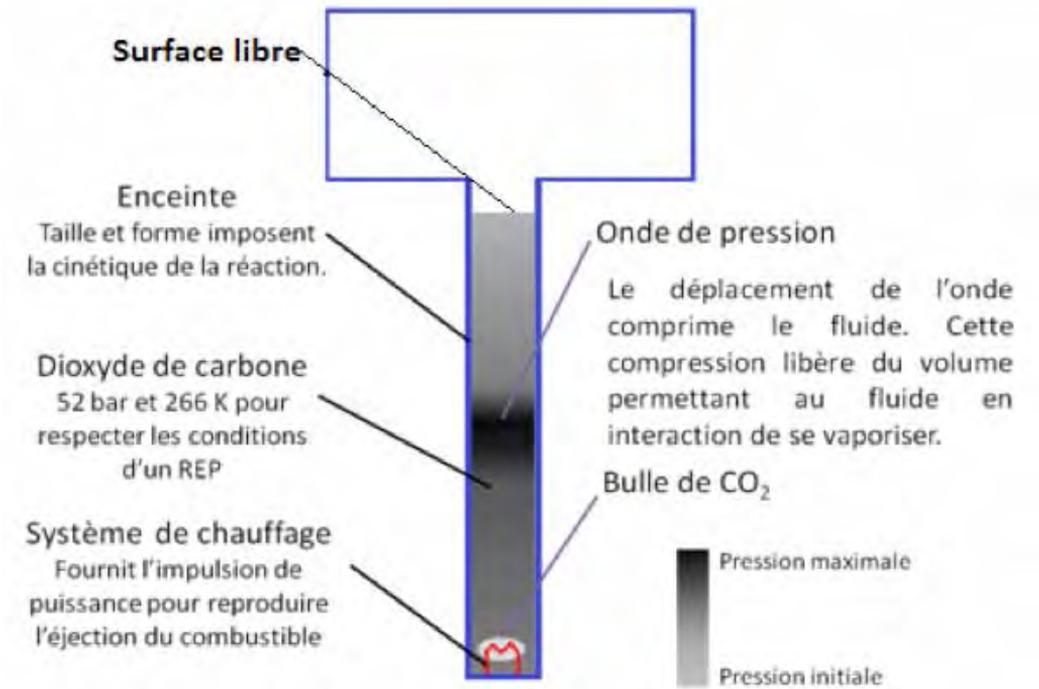


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental

Sujet de la thèse :

**Ejection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire :
modélisation de la dynamique**

Doctorant :	Yixian ZHOU
Date du début de la thèse :	14/10/2013
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LIMAR
Financement de thèse :	co-financement EDF - IRSN
Directeur de thèse :	Pascale AUSSILLOUS - AMU IUSTI
Tuteur de thèse :	Pierre RUYER
Ecole doctorale :	AMU/ED «Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique»

Une insertion accidentelle de réactivité en réacteur peut conduire à une rupture de la gaine des crayons combustibles et à une mise en contact des particules de combustible nucléaire chaud et du gaz pressurisé avec le fluide caloporteur. La violence de l'interaction qui en résulte dépend notamment fortement du débit de vidange de ces particules vers le fluide. Le but de cette thèse est d'étudier la dynamique de cette vidange et d'identifier les paramètres dominants. Nous simulons numériquement et expérimentalement, des milieux composés d'une collection granulaire dense et d'un gaz s'écoulant d'un espace confiné vers un espace libre.

Nous étudions expérimentalement la vidange d'un silo rempli de billes de verre sphériques. Les grandeurs à mesurer sont le débit massique des particules et la pression tout au long de la hauteur du silo. Les paramètres de contrôle sont la taille des billes, la taille du trou et le débit de gaz injecté. D'abord, des expériences de vidange de silo avec un orifice en bas ou sur le côté sans l'effet de l'air ont été réalisées et interprétées. Ensuite, nous avons réalisé une série d'expériences avec un écoulement d'air à contre-courant ou co-courant. Des lois comportementales pour le débit de particules ont été mises en évidence.



Afin de mieux interpréter nos mesures, nous avons utilisé deux outils numériques :

- 1) LMGC90 est un logiciel libre qui simule la dynamique de contact des milieux granulaires par éléments discrets.
- 2) Basilisk est un logiciel libre qui résout les équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes auxquelles on a adjoint une loi rhéologique pour décrire le comportement du milieu granulaire. LMGC90 nous permet d'étudier finement le mouvement des grains en l'absence de fluide pour des domaines spatiaux limités. Avec Basilisk, l'approche est plus macroscopique mais permet de simuler des effets tri-dimensionnels observés dans l'expérience et liés aux frottements sur les parois du silo, ainsi que d'introduire l'effet de l'écoulement d'air. Des premiers résultats très satisfaisants ont été obtenus.

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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Nathalie MONCOFFRE - CNRS Institut de physique nucléaire de Lyon
Tuteur de thèse :	Roland DUCHER
Ecole doctorale :	Université Lyon 1/ED PHAST

Ce travail se situe dans le cadre de l'amélioration de modèles prédictifs permettant l'évaluation des rejets de produits radioactifs lors d'un accident du cœur d'un réacteur à eau sous pression (REP). Dans cette perspective, il faut évaluer le terme source, c'est-à-dire le relâchement des produits de fission (PF) hors du combustible nucléaire. Le PF étudié ici est le molybdène qui est, d'une part, abondamment produit lors de la fission (6% des fissions de ^{235}U), et est, d'autre part, un élément clé de la chimie du combustible. Son comportement est fortement lié à l'évolution du potentiel oxygène dans la matrice combustible. Il a ainsi été montré que la formation d' UO_{2+x} augmentait la mobilité du molybdène. De plus, le potentiel redox du couple Mo/MoO_2 étant très proche de celui de l' UO_2 en fonctionnement nominal, le Mo peut jouer un rôle de tampon d'oxydation du combustible. Enfin, le molybdène peut former de nouveaux composés avec d'autres PF, comme le césium ou le baryum, modifiant ainsi leur comportement en réacteur (relâchement, volatilité...).

Les études expérimentales menées sur la diffusion des PF (dont le Mo) dans l' UO_2 en conditions accidentelles, portent principalement sur des échantillons de combustible irradiés (e.g. programme VERCORS, Phébus PF). Le rôle du molybdène y a donc été étudié en présence de nombreux autres PF (Cs, Ba...), ce qui ne permet pas 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 seul dans UO_2 et UO_{2+x} (x compris entre 0 et 0,1). La démarche adoptée consiste à introduire dans des échantillons d' UO_2 vierges (oxydé ou non) du Mo par implantation ionique. Les profils de concentration du Mo implantés sont ensuite suivis par SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), avant et après traitement des échantillons (effet d'irradiation, thermique), et les coefficients de diffusion apparents directement déduits de l'évolution de ces profils. Ces valeurs sont ensuite comparées aux modélisations (calculs ab-initio, DM) effectuées à l'IRSN. Par ailleurs, la spectroscopie Raman est utilisée pour caractériser l'état d'endommagement créé par l'implantation et l'irradiation ainsi que l'état d'oxydation. Nous présenterons ici les avancées expérimentales concernant l'oxydation contrôlée des échantillons d' UO_2 , la mise au point et les premiers résultats des mesures SIMS (voir Figure 1) pour déterminer les profils concentration de Mo, ainsi que les premières informations données par le Raman.

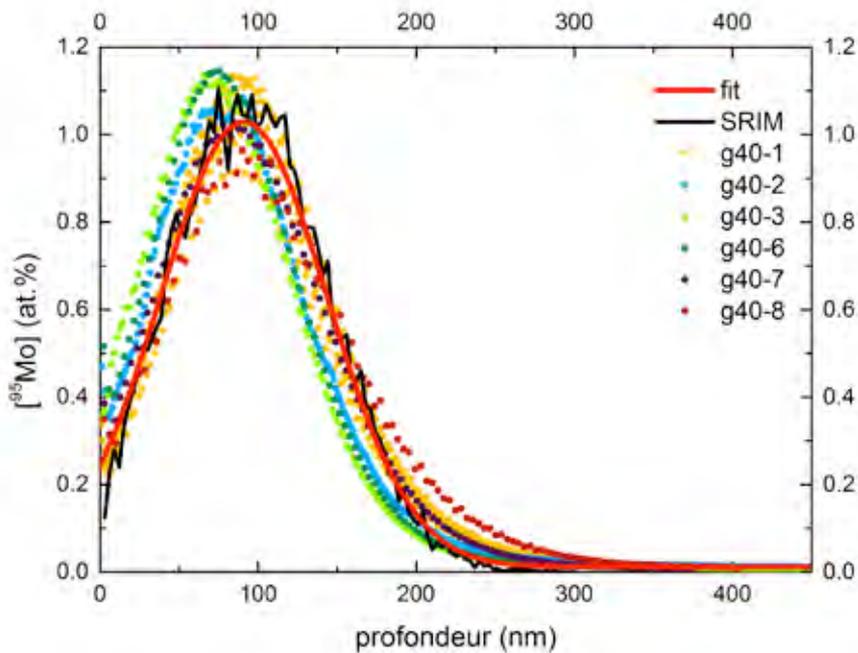


Figure 1. Profils de concentration obtenus par SIMS du ^{95}Mo dans un échantillon d' UO_2 « tel qu'implanté » (implantation de $10^{16} \text{ Mo.cm}^{-2}$, $E = 400 \text{ keV}$) (pointillés).
Trait rouge : Fit gaussien des profils.
Trait noir : Simulation SRIM des conditions d'implantations.

➤ **Mardi 22 mars**

17h50

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PARALLÈLE

Systemes et équipements de confinement & réactivité des aérosols

Présidente : Nathalie BARDIN MONNIER,
Maître de conférences à l'Université de Lorraine.
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés.

Salima KAISOON, 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.

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

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
Financement de thèse : IRSN/EDF-CIDEN
Directeur de thèse : Eric CLIMENT - Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
Tuteur de thèse : Laurent RICCIARDI, Corinne PREVOST
Ecole doctorale : Toulouse, Ecole Doctorale Mécanique Energétique, Génie Civile & Procédés - MEGeP

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 qui peuvent être soit inhérentes à la conception de l'enceinte (jointures de portes, rideaux à lamelle, ...), soit accidentelles (déchirures, ...). 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 ainsi à transporter la contamination à l'extérieur de l'enceinte, ce phénomène étant communément appelé 'rétrodiffusion des polluants'. L'objectif principal de la thèse est donc de comprendre les mécanismes induisant ces inversions locales de l'écoulement et d'évaluer la capacité des différentes méthodes de simulations à les reproduire. Ces méthodes sont la méthode RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), la LES (Simulation des grandes échelles) et la DNS (Simulation numérique directe).

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 de type fentes rectangulaires dont le diamètre hydraulique n'excède pas 10 cm. De premiers résultats qualitatifs ont pu être visualisés au cours d'expérimentations laser exploratoires réalisées dans une enceinte de faible volume. Ces expérimentations ont permis d'identifier différentes sources possibles des phénomènes de rétrodiffusion :

- un écoulement transverse à celui au droit de l'ouverture, en amont ou en aval de celle-ci,
- une perturbation instationnaire de pression, de nature impulsionnelle ou périodique,
- une perturbation transitoire et brutale au moment de la création de l'ouverture considérée,
- une perturbation liée à la présence d'un obstacle à proximité de l'ouverture, en amont ou en aval de celle-ci, pouvant induire des recirculations.

Par la suite, une premiere campagne de simulations U-RANS et DNS (a l'aide respectivement des codes ANSYS CFX et JADIM) a ete realisee sur une geometrie de faible volume, dans l'objectif notamment d'aider au dimensionnement d'une maquette elementaire finement instrumentee qui permettra d'etudier plus en detail certains des scenarios de retrodiffusion precedemment identifies.



Visualisation Laser du phenomene de retrodiffusion sur une fente rectangulaire

Sujet de la thèse :**Impact sur le colmatage en régime permanent et transitoire 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 - LEMAC
Financement de thèse :	IRSN/Math2Market/LRGP
Directeur de thèse :	Dominique THOMAS/Nathalie BARDIN MONNIER - LRGP Nancy
Tuteur de thèse :	Thomas GELAIN
Ecole doctorale :	Université de Lorraine/RP2E - ED 410

Les filtres THE (à très haute efficacité) jouent un rôle essentiel dans le confinement dynamique des matières radioactives dans les installations nucléaires de base (INB). La connaissance et l'anticipation du comportement de ces équipements, en régimes nominal et accidentel, constituent un enjeu majeur pour l'IRSN. De nombreux travaux expérimentaux menés dans ce cadre (Joubert 2009, Mocho et al. 2011, Bourrous 2014) ont permis de montrer la diversité et la complexité des phénomènes mis en jeu. A l'heure actuelle, peu de modèles permettent la prédiction de l'évolution de la résistance aéraulique d'un filtre plissé THE durant toutes les phases de filtration, pour les conditions d'usage de l'industrie nucléaire (vitesse de filtration < 10 cm/s). Afin de pallier ce manque, ce travail de thèse propose une double approche numérique et expérimentale, basée sur la validation, par des données expérimentales, de codes CFD existants (Ansys, GeoDict). Ceux-ci doivent permettre *in fine*, au terme d'études paramétriques, de développer des modèles prédictifs de colmatage des filtres plissés à caractère phénoménologique.

Le colmatage d'un filtre plissé étant piloté en partie par l'écoulement de l'air au sein de ses plis, la première partie de ce travail de thèse a concerné la caractérisation expérimentale des écoulements au sein des plis du filtre en utilisant une technique de diagnostic optique, dans le but de valider les simulations CFD menées en parallèle. Les résultats obtenus montrent un bon accord entre les champs de vitesse expérimentaux et numériques.



Figure 1. Champ de vitesse en entrée de pli d'un filtre THE

La suite des travaux consistera en une étude expérimentale et numérique du transport et du dépôt des particules au sein des filtres plissés THE.

Sujet de la thèse :**Interaction between fission products and sodium fire aerosols in case of an accident in sodium cooled nuclear reactor**

Doctorant :	Ankita JADON
Date du début de la thèse :	17/02/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Denis PETITPREZ - Université de Lille 1
Tuteur de thèse :	Sidi SOUVI, Nathalie GIRAULT
Ecole doctorale :	Lille 1 - Sciences de la Matière du Rayonnement et de l'Environnement SMRE - ED104

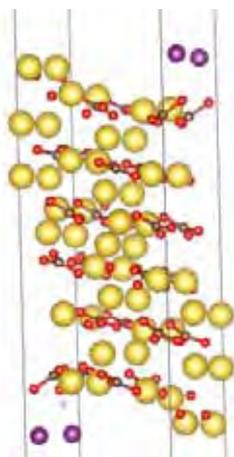
In the context of Gen IV reactor development, the consequences of a severe accident in sodium cooled fast nuclear reactor (SFR) have to be investigated to evaluate the potential risks on human health and environment. One critical risk of a severe accident (SA) is the core disruption accident and production of sodium contaminated aerosols in the containment building by ejection of primary-coolant-system sodium, through the reactor top vault. Being pyrophoric, the ejected sodium droplets react instantaneously with oxygen with a significant release of heat of combustion that will potentially increase the temperature and pressure inside the containment building which can pose danger to its integrity. The different and successive species of sodium aerosols formed are sodium oxides/peroxides/hydroxides/carbonates. They are characterized by different chemical toxicity, reactivity and chemical affinity with the fission products. The contamination of these species has to be studied for a better prediction of the radiological potential release into the environment. Iodine will be of our interest because of its high radiological impact and the possibility to have highly volatile species.

The aim of this doctoral research is then to study the interaction between sodium fire aerosols and gaseous iodine by answering the following questions.

- How efficient is gaseous iodine uptake on sodium fire aerosols and what are the major products of these reactions?
- What is the kinetics of such reactions and the most influent parameters like temperature, partial pressure of gaseous iodine and relative humidity?

A part of first year of PhD was dedicated to carry out surface energy calculations of sodium carbonate using the density functional theory; VASP (Vienna ab-initio simulation package). Most stable surface of sodium carbonate has been identified. The reactivity of this surface with I_2 and HI in gas phase was studied and the value of saturation partial pressure (P_k) for iodine was calculated. Simultaneously, complementary experiments were performed in the L2EC laboratory at the IRSN, Cadarache.

The second and third year of PhD will be dedicated to carry out *ab-initio* calculations of other possible surfaces of sodium carbonate and bicarbonate/peroxide/hydroxide. The results from these calculations will set milestones for further complementary experimental investigations.



Iodine molecules
on Na_2CO_3 slab

➤ Mardi 22 mars

17h50

Salle Bretagne

SESSION PARALLÈLE**Transferts des radionucléides dans l'environnement**

Présidente : Nathalie LEMAITRE,
Responsable mission, stratégie et programme.
Direction de la stratégie, du développement
et des partenariats (DSDP).

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.

Hugo RENARD, Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium au sein d'un écosystème prairial : caractérisation des flux et analyse de sensibilité.

Huong Liên NGUYEN, Evolution de la contamination en radionucléides de la zone d'exclusion de Tchernobyl : de la tranchée T22 à l'échelle du bassin versant.

Mohamed Amine CHERIF, Modélisation dynamique de la (bio)disponibilité des éléments chimiques dans les sols : approche comparative modèles-expériences appliquée au transfert de strontium et de césium dans la ZNS.

Sujet de la thèse :**Variabilité des teneurs en Tritium Organiquement Lié et Carbone 14
au sein des hydrosystèmes continentaux côtiers méditerranéens.
Rôle de la qualité de la matière organique**

Doctorant :	Loïc DUCROS
Date du début de la thèse :	17/11/2014
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/LRTE
Financement de thèse :	IRSN/région PACA
Directeur de thèse :	Sabine CHARMASSON (IRSN)
Tuteur de thèse :	Frédérique EYROLLE-BOYER
Ecole doctorale :	Aix Marseille Université / ED 251

Le tritium, radioisotope de l'hydrogène ($T_{1/2} = 12,3$ ans) et le carbone 14 ($T_{1/2} = 5730$ ans) sont naturellement présents dans l'environnement (origine cosmogénique). Ils ont également été rejetés massivement dans l'atmosphère lors des tests atmosphériques (entre 1945 et 1980) et sont aujourd'hui considérés comme les radionucléides les plus rejetés par l'industrie nucléaire en France. Ces deux radioisotopes suivent les cycles de l'eau et de la matière organique sous différentes formes : gazeuses (HT, $^{14}\text{CO}_2$), liquides (HTO) et organiques (Tritium Organiquement Lié et Carbone Organique). Si la radiotoxicité de ces deux émetteurs β a été particulièrement étudiée pour les formes libres, elle n'est que peu connue pour les formes liées.

De nombreuses études ont mis en évidence une importante variabilité des teneurs en tritium entre les formes libres et liées dans de nombreuses matrices environnementales (terrestres et aquatiques) et espèces vivantes indicatrices. De plus, de récents travaux ont mis en avant le rôle du transfert différé de la matière organique détritique, marquée par les retombées des tests nucléaires passés, pour expliquer les déséquilibres observés.

La première partie de cette thèse a été centrée sur l'identification des zones préférentielles de dépôts des retombées des tests nucléaires et sur l'analyse de prélèvements environnementaux collectés sur ces zones. En parallèle, des carottes sédimentaires et ligneuses ont été prélevées sur des sites non influencés par des rejets industriels pour reconstruire les chroniques de concentrations en tritium et ^{14}C au cours des 70 dernières années.

Au vu des faibles concentrations actuelles en tritium dans l'environnement (hors influences anthropiques contemporaines), ce travail s'est orienté sur l'instrumentation d'une zone atelier située à proximité du centre CEA de Marcoule afin d'étudier les différents paramètres de transfert de la matière organique sur un sous bassin versant marqué par des rejets chroniques de tritium. Cette instrumentation terrestre et aquatique permet la mesure *in situ* d'un certain nombre de paramètres hydrologiques (turbidité, débits...) et l'acquisition d'échantillons environnementaux (végétaux, sols, sédiments, précipitations). Cet ensemble de données permettra d'alimenter un modèle de transferts du ^3H et du ^{14}C à l'échelle d'un sous bassin versant élémentaire en incluant les différents compartiments environnementaux.



Localisation de la zone atelier et de l'instrumentation mise en place

Sujet de la thèse :**Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium dans un écosystème prairial : caractérisation des flux et analyse de sensibilité**

Doctorant :	Hugo RENARD
Date du début de la thèse :	01/10/2014
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/LRC-LM2E
Financement de thèse :	IRSN/EdF
Directeur de thèse :	Denis Maro - IRSN
Tuteur de thèse :	Séverine Le Dizès-Maurel
Ecole doctorale :	ED 251, Sciences de l'Environnement

Le tritium est rejeté dans l'environnement par les centrales nucléaires, des installations nucléaires de défense, les usines de retraitement des combustibles usés. Les rejets auront tendance à augmenter dans un futur proche avec le développement de nouvelles installations telles que ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). De plus, 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 les végétaux ces incertitudes concernent principalement le fractionnement isotopique du tritium ainsi que la formation du tritium lié à la matière organique durant la nuit.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'avoir une quantification plus précise des 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-3H prévu pour calculer les transferts de tritium dans un écosystème prairial avec un pas de temps horaire.

L'objectif de ce travail de thèse est d'intégrer dans ce modèle un module hydrologique qui fait intervenir un bilan hydrique du sol, ainsi qu'un module éco-physiologique qui sera établi à l'issue de deux études complémentaires : une première étude concerne la cinétique de formation à pas de temps horaire du tritium lié à la matière organique dans la plante ; la seconde étude concerne la cinétique de formation de l'eau tritiée (HTO) dans le sol à partir d'une source atmosphérique d'hydrogène tritié (HT).

Pour quantifier la pertinence de ces modules, les processus implémentés seront confrontés à des mesures réalisées *in situ* et en laboratoire.

Un dispositif de culture hydroponique (hors-sol) est développé en laboratoire pour approfondir les connaissances sur le fractionnement du tritium isotopique du tritium dans l'herbe et la formation du tritium lié à la matière organique la nuit.

Les données de terrain liées au processus de conversion de HT en HTO proviendront d'un atelier d'expérimentations spécifiques situé sous les vents dominants de l'usine de retraitement des combustibles usés AREVA NC La Hague (Nord Cotentin) (Ci-dessous).



Sujet de la thèse :**Caractérisation de la pollution en radionucléides dans la zone d'Exclusion de Tchernobyl : de la tranchée T22 à l'échelle du bassin versant**

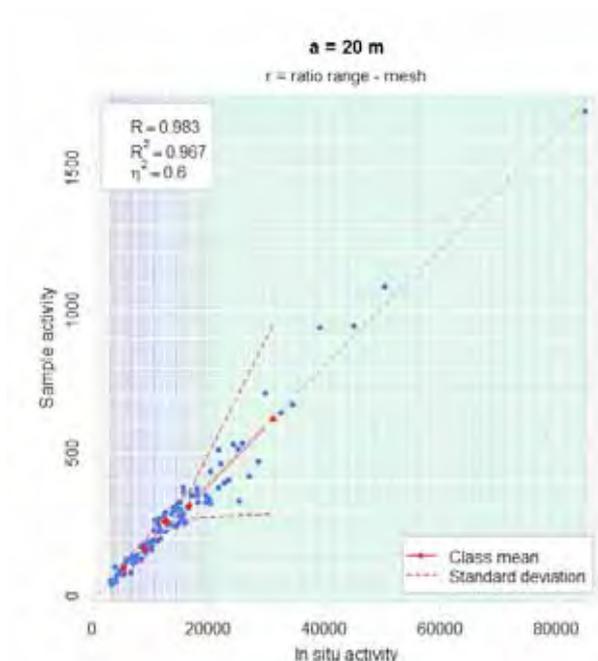
Doctorant :	Huong Liên NGUYEN
Date du début de la thèse :	13/01/2014
Laboratoire :	PRP - DGE/SRTG/LT2S
Financement de thèse :	IRSN/ARMINES
Directeur de thèse :	Chantal de FOUQUET - Armines (Mines ParisTech)
Tuteur de thèse :	Christelle COURBET
Ecole doctorale :	Paris VI - Géosciences et ressources naturelles - ED 398

Cette étude a pour but de développer une méthodologie visant à évaluer l'impact sur la qualité des sols et des eaux souterraines de 800 tranchées où ont été enterrés des déchets radioactifs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, un an après l'accident.

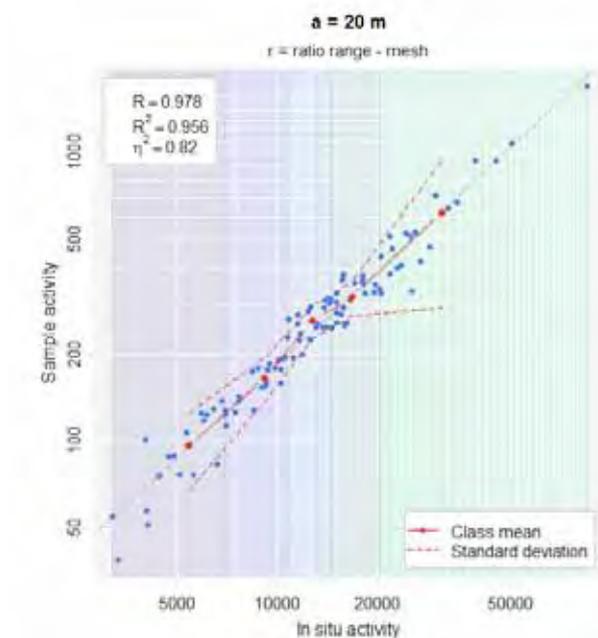
Dans le travail ici présenté, les outils classiques de la géostatistique sont déployés sur des mesures d'activité en ^{137}Cs dans une de ces tranchées afin d'estimer de manière fiable son stock de radionucléides. Une stratégie d'échantillonnage est ensuite définie en garantissant un bon compromis entre précision et nombre de mesures pour la mettre en œuvre sur les autres tranchées de la zone d'exclusion. La précédente analyse géostatistique effectuée à partir de 3000 mesures *in situ* acquises en 1999 est reprise afin d'améliorer les estimations. Les nouveaux résultats fournissent des limites de tranchée mieux définies, grâce à l'intégration de données géoradar (indiquant la profondeur de la tranchée) en tant que variable auxiliaire d'un cokrigeage. Des simulations sont par ailleurs réalisées sur les données d'activité pour déduire les incertitudes de l'estimation du stock du ^{137}Cs qui est plus élevé que celui obtenu en 1999, mais qui reste dans le même ordre de grandeur.

Toutefois, ces estimations reposent sur une corrélation linéaire entre taux de comptage et activité. Les incertitudes associées à cette hypothèse de linéarité nécessitent d'être analysées. Comme les données utilisées pour établir cette relation sont indisponibles, un exercice théorique est conduit afin de tester cette corrélation sur 100 simulations géostatistiques. Cette étude paramétrique vise à évaluer l'impact de différents paramètres, comme le modèle de variogramme, sur les résultats de la corrélation entre activité fictive d'un échantillon de sondage et l'activité convoluée autour de cet échantillon.

Parallèlement à cette étude, un plan d'échantillonnage est élaboré pour quantifier le stock de radionucléides à partir de 60 mesures en se basant sur les anciennes données *in situ*. Par la suite, un modèle hydrogéologique sera construit afin d'évaluer les conséquences de la variabilité spatiale du stock de radionucléides sur le panache de pollution produit sous la tranchée T22.



Corrélation entre mesures de l'activité in situ et sur l'échantillon pour une portée égale à 20 fois la taille de la maille



Présentation des données sur une échelle logarithmique

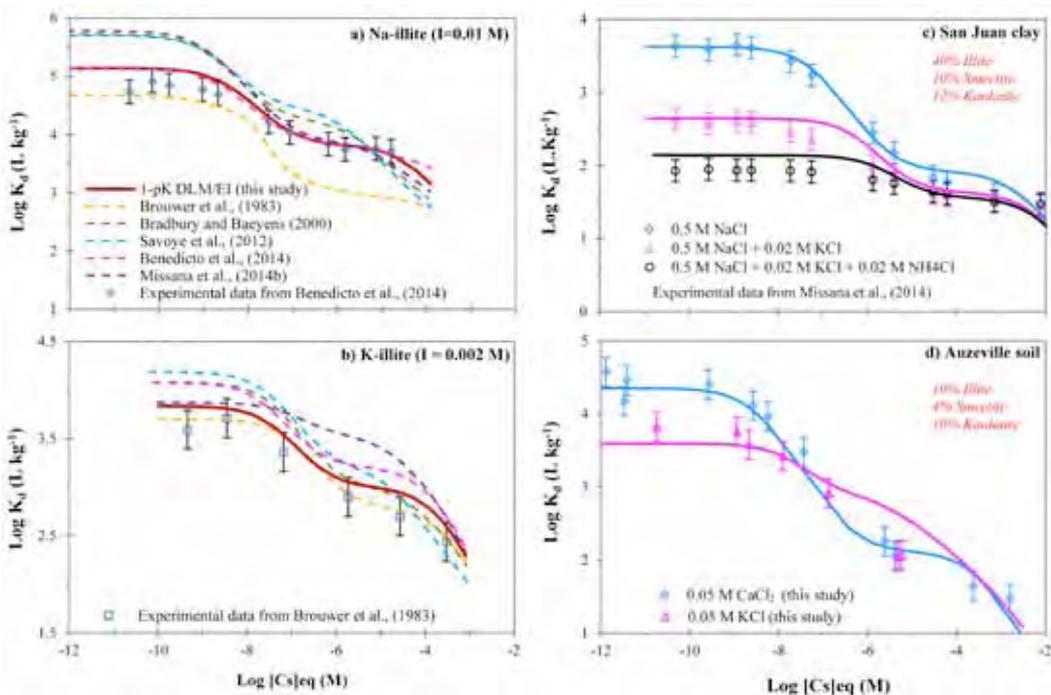
Sujet de la thèse :

**Modélisation dynamique de la (bio)disponibilité des radionucléides dans les sols :
approche comparative modèles-expériences appliquée au transfert de Cs(I)
dans la ZNS**

Doctorant :	Mohamed Amine CHERIF
Date du début de la thèse :	02/12/2013
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/L2BT
Financement de thèse :	IRSN/région PACA
Directeur de thèse :	Frédéric Gerard - INRA UMR Eco&Sols Olivier Bildstein - CEA Cadarache
Tuteur de thèse :	Arnaud Martin-Garin
Ecole doctorale :	Aix-Marseille/ED Sciences de l'Environnement - ED 251

Ce travail vise à améliorer les outils permettant de prédire le transfert des radionucléides dans le système sol/solution du sol/système racinaire des végétaux. En menant une analyse critique des modèles numériques existants, l'objectif est de développer un modèle générique capable de mieux rendre compte de ces transferts dans le cas du Cs. La première partie de ce travail a été consacrée à l'analyse des modèles disponibles dans la littérature pour décrire l'adsorption du césium par les minéraux argileux, que l'on considère comme le processus qui contrôle majoritairement la disponibilité environnementale de cet élément dans les sols. Cette analyse a débouché sur la formulation d'un nouveau modèle mécaniste combinant deux modèles d'adsorption : (i) un modèle de complexation de surface pour rendre compte de l'adsorption des ions au niveau des sites hydroxyles de charges variables (bordure des feuillettes), et (ii) un modèle d'échange ionique pour l'adsorption des cations au niveau des sites de charges permanentes (les surfaces planes). Cette approche minimaliste a été testée afin de modéliser l'adsorption du Cs sur (i) trois minéraux argileux de référence (l'illite, la montmorillonite et la kaolinite) et (ii) plusieurs matériaux argileux naturels, et ce dans des conditions physico-chimiques différentes. Ce travail a permis de valider le modèle mécaniste proposé et de démontrer qu'il constitue un avantage majeur par rapport aux différents modèles existants, car il permet de rendre compte des niveaux d'interactions variables du Cs avec ces substrats argileux, sans ajustement préalable des paramètres.

La deuxième partie du travail est consacrée, (i) à la réalisation d'une série d'expérimentations, conduite en milieux contrôlés sur des systèmes dynamiques (réacteur à flux, Rhizotests couplant sol, solution et plante ou DGT), et (ii) à la modélisation de la (bio)disponibilité du Cs dans ces systèmes. Ainsi, une série d'expérimentations sur un sol naturel (Auzeville), contenant des minéraux argileux, a été conduite dans différents environnements physico-chimiques. A ce stade d'avancement, les interactions entre solide et solution ont pu être correctement reproduites en prenant en compte la fraction argileuse du sol uniquement. Les outils numériques permettant de coupler interactions géochimiques et transport sont en cours de développement pour la phase finale du projet.



Figures a et b :

Isothermes d'adsorption du Cs sur (a) Na-illite (données expérimentales extraites de Benedicto et al., (2014)), (b) K-illite (données expérimentales extraites de Brouwer et al., (1983)). Les courbes rouge en trait continu représentent les résultats de simulation du modèle proposé (1-pK Double Layer Model/ Ionic Exchange), les courbes en pointillés représentent les résultats des modèles d'échange cationique multi-sites.

Figures c et d :

Isothermes d'adsorption du Cs sur (c) l'argile naturelle de San Juan (données expérimentales extraites de Missana et al., (2014) et (d) le sol d'Auzeville (données expérimentales produites au L2BT), dans des conditions physico-chimiques différentes. Les courbes en trait continu représentent les résultats de simulation du modèle proposé.

➤ Mercredi 23 mars

08h30

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PLÉNIÈRE

L'aléa sismique et sa prise en compte en sûreté

Président : Georges NAHAS,
Chercheur au Service d'Expertise des équipements
et des Structures.

Oona SCOTTI, L'étude de l'aléa sismique à l'IRSN :
une expertise nourrie par la recherche.

Elif ORAL, Modélisation de la propagation des ondes sismiques
en 3D dans des milieux linéaire et non-linéaire.

Vincent PERRON, Evaluation empirique des effets de site :
développement d'une méthodologie adaptée aux zones de faibles
sismicités.

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

Sujet de la thèse :**Spectral element modeling of seismic wave propagation in 1D-1C and 1D-3C
linear and nonlinear media including pore pressure effects**

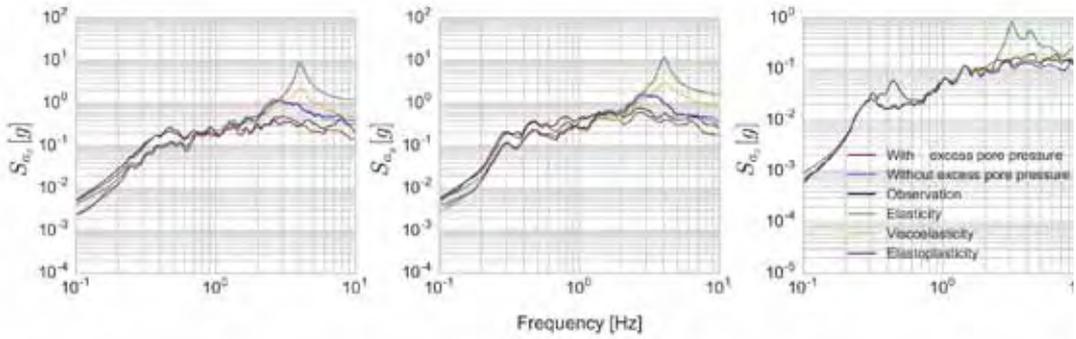
Doctorant :	Elif ORAL
Date du début de la thèse :	06/11/2013
Laboratoire :	PRP-DGE/SCAN/BERSSIN
Financement de thèse :	IRSN-IFSTTAR
Directeur de thèse :	Fabian BONILLA (IFSTTAR)
Tuteur de thèse :	Céline GELIS, Elise DELAUAUD
Ecole doctorale :	Paris-Est, Sciences, Ingénierie et Environnement - ED 351

In low to moderate seismic areas, recorded ground motion remains generally weak. However, when strong ground motion occurs, nonlinear effects may take place in superficial geological layers. To assess such phenomena, numerical modeling of seismic wave propagation is essential. In that context, the consideration of the soil nonlinearity in the modeled media holds an important place in order to achieve realistic simulations for strong seismic shaking. Additionally, in the presence of strong ground motion in saturated soils, the pore pressure becomes an important parameter to take into account for the related phenomena such as flow liquefaction and cyclic mobility.

In this study, one component (1C) - seismic wave propagation is modeled in linear (elastic or viscoelastic) and nonlinear (plastic) media in a layered soil (1D). The study is extended to a 1D-3C model and the influence of the excess pore pressure is included. Numerical simulations are based on the spectral element method.

To validate our approach, the strong ground motion modification due to the presence of soil layers is studied on the sites of Wildlife (USA) and Onahama (Japan) which were affected by the 1987 Superstition Hills and the 2011 Tohoku earthquakes, respectively. In these sites, soil properties are well characterized and recorded motions are available both in a borehole at depth and at the surface.

For both sites, 1D-3C calculated motions at the surface using the nonlinear soil constitutive model and including pore pressure effects are similar to recorded motions. The calculated motions are amplified at low frequency and damped at high frequency due to excess pore pressure. Furthermore, a sensitivity study is conducted to assess the importance of different hypotheses. Thus, using other constitutive models or excluding pore pressure effects leads to significantly different acceleration response spectra (see Figure). Moreover, despite the similitude in acceleration and velocity waveforms, significant differences in displacement waveforms of 1C and 3C approaches are remarked and the multidimensional effect (3C) produces stronger pore pressure excess. These comparisons help identifying and understanding dominant phenomena occurring in superficial layers, depending on local conditions and input motions. This is of great importance for site-specific studies.



Acceleration response spectra for different soil constitutive models (green: elastic; orange: viscoelastic; purple: elastoplastic; blue: viscoelastoplastic with no excess pore pressure development; red: viscoelastoplastic with excess pore pressure development) for the three components of the seismic motion at the Wildlife (USA) site.

Sujet de la thèse :

Evaluation empirique des effets de site : développement d'une méthodologie adaptée aux zones de sismicité faible à modérée

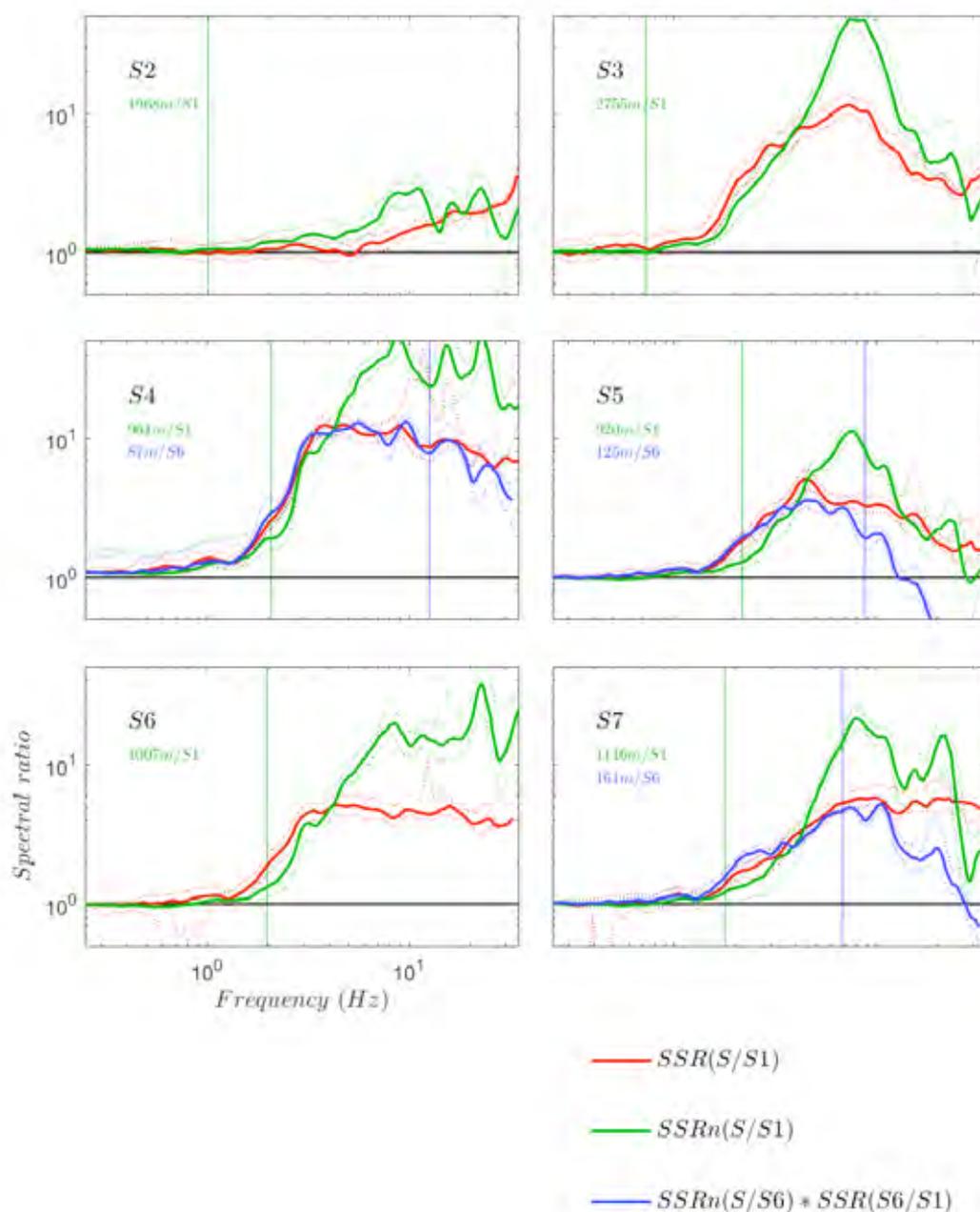
Doctorant :	Vincent PERRON
Date du début de la thèse :	04/11/2013
Laboratoire :	PRP-DGE/SCAN/BERSSIN
Financement de thèse :	CEA/IRSN
Directeur de thèse :	Pierre-Yves Bard - Université de Grenoble
Tuteur de thèse :	Céline Gélis (IRSN)/ Fabrice Hollender (CEA)
Ecole doctorale :	Terre, Univers, Environnement Grenoble 1 - ED 105

Le mouvement sismique enregistré en un site donné provient de différents phénomènes physiques. Ainsi, la rupture d'une faille génère un champ d'onde sismique qui se propage dans la croûte terrestre et dans les couches géologiques superficielles jusqu'au site d'étude. La modification du mouvement par ces couches correspond aux effets de site.

Dans certaines configurations géologiques (e.g., remplissage sédimentaire, topographie), les effets de site amplifient le mouvement du sol, en allongent la durée et en modifient le contenu fréquentiel. Cette thèse adresse la question de l'évaluation des effets de site à partir d'enregistrements dans le contexte français de sismicité faible à modérée. En effet, l'application de la méthode de référence d'évaluation empirique des effets de site, consistant à évaluer l'amplification du mouvement sismique sur le site d'étude par rapport à celui enregistré sur un site de référence (méthode site sur référence, SSR) à partir d'enregistrements de séismes, requiert un nombre suffisant de séismes.

Le premier objectif de cette étude est d'évaluer la quantité et la qualité des enregistrements réalisables sur un site industriel en France métropolitaine dans un intervalle de temps limité. Pour cela, une base de données de 500 séismes a été constituée à partir de 2 ans et demi d'enregistrements continus sur un site industriel du sud-est de la France. La méthode SSR a été appliquée à ces données, permettant de déterminer l'amplification du mouvement sismique pour les stations situées dans une cuvette sédimentaire par rapport aux stations au rocher. L'exploration d'approches alternatives apparaît cependant utile pour les sites où la sismicité est plus faible.

Le bruit sismique ambiant constitue la plus grande partie des enregistrements. Les dernières études ont montré sa sensibilité à la présence de certaines configurations géologiques superficielles. Le deuxième objectif de cette étude est ainsi de tester la capacité du bruit enregistré à estimer l'amplification du mouvement sismique (SSRn) en comparant les résultats obtenus avec ceux issus du SSR. Enfin, une nouvelle approche pour estimer la variabilité spatiale de l'amplification est proposée en utilisant le SSRn relatif à une station proche où une évaluation du SSR est disponible (voir Figure).



Comparaison entre les résultats issus de la méthode classique SSR (en rouge) avec ceux obtenus à partir du bruit ambiant (SSRn) pour 6 sites de mesures (de S2 à S7) relativement à la référence au rocher S1. Les SSRn évalués à partir du bruit ambiant et prenant comme référence le site au rocher S1 correspondent aux courbes vertes. Les courbes bleues sont obtenues à partir du SSRn se référant à la station dans le bassin sédimentaire S6 et du SSR évalué entre S6 et S1. Sur chacune des figures les traits pleins représentent les médianes et les traits pointillés indiquent les percentiles 16 et 84 %. Les barres verticales symbolisent les fréquences correspondant à une longueur d'onde entre le site d'étude et la référence.

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

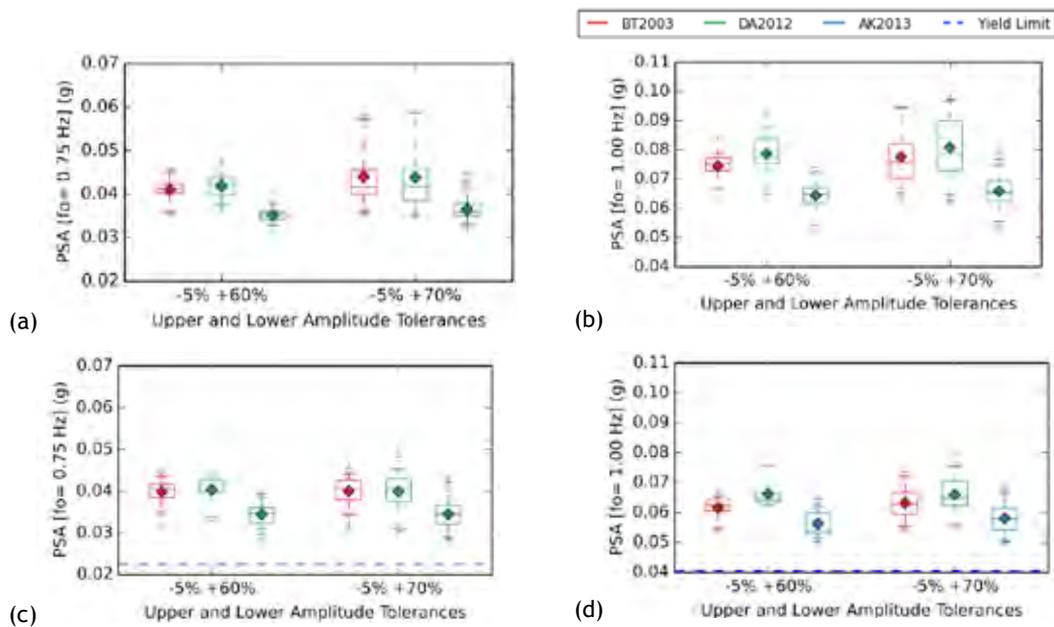
Doctorant :	Levent ISBILIROGLU
Date du début de la thèse :	16/12/2014
Laboratoires :	PRP-DGE/SCAN/BERSSIN et ISTERre (UJF Grenoble)
Financement de thèse :	ANR SINAPS
Directeur de thèse :	Philippe GUEGUEN - IFSTTAR
Tuteur de thèse :	Maria LANCIERI - IRSN
Ecole doctorale :	Grenoble/Terre, Univers, Environment - ED 105

Nonlinear dynamic analysis is gaining more importance among the engineers to determine the seismic behavior of structures under input ground motions (GMs). A nonlinear analysis is very sensitive to selected input GMs (seismic loading); however, there has not been a consensus among engineers and seismologists on how to select and scale GMs for nonlinear analysis. The goal of this PhD project is to quantify the effects of different input waveforms such as real, stochastic, seismic-source based, and spectral-matched GMs on nonlinear structural responses of 1-/3-D and single-/multi-degree-of-freedom structural models.

During the first year of PhD study, the available ground motion selection and modification (GMSM) methods have been reviewed and the previous literatures comparing these methods for structural responses have been studied. Also, a computer tool has been developed with the capability of selecting spectrum-compatible real EQ records (unscaled) and then performing inelastic structural analyses on single-degree-of-freedom (SDOF) oscillators. Further, spectrum compatible real record selection in accordance with ASN Guide 2-01 (2006) are evaluated.

Spectrum compatible record selection is one of the most frequently used methods to select and modify GMs. The idea is to find the satisfactory GM sets within the amplitude tolerances (upper and lower) and the frequency range of the target spectrum. One way to obtain the target spectrum is the use of GMPEs. Each of GMPEs requires different input values and introduces different classifications; therefore, the input values (such as site conditions and fault distances) need to be chosen in harmony.

The figure shows the structural responses (PSAs) for two liner-elastic and two elastoplastic SDOF oscillators. It can be observed that different sets of GMs can be obtained for the same earthquake scenario. It can also be noticed that increasing upper amplitude tolerance tends to increase the mean and the variability. The yield limits oscillators are shown with blue dashed lines and it can be seen that 0.75 and 1.00 Hz oscillators mostly yields under the input GMs.



Investigation of the effect of using different ground motion prediction equations (GMPEs) as target on the structural response of (a,b) elastic and (c,d) elastoplastic single-degree-of-freedom (SDOF) oscillators. Diamond markers represent the mean value. Each box includes 25th and 75th percentiles and the median is shown with a horizontal line within each box. The whiskers indicate the 5th and 95th percentiles and the probable outliers are given by grey markers. BT2003= Berge-Thiery et al. 2003, DA2012= Di Alessandro et al. 2012 and AK2013= Akkar et al. 2013.

➤ Mercredi 23 mars

10h25

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PARALLÈLE**Pathologies induites par les rayonnements
et stratégies thérapeutiques ; approches épidémiologiques**

Présidente : Céline DINOCOURT,
Responsable mission, stratégie et programme.
Direction de la stratégie, du développement
et des partenariats (DSDP).

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

Cyprien JAILLET, Modifications radio-induites du glycome des protéines membranaires endothéliales : implications sur le recrutement des cellules circulantes et sur la thrombose vasculaire dans le tissu irradié.

Benoît USUNIER, Biothérapie du traitement des effets secondaires de la radiothérapie ; étude préclinique du traitement des effets secondaires des radiothérapies abdomino-pelviennes par les Cellules Souches Mésenchymateuses chez le rat Sprague-Dawley dans un modèle d'irradiation fractionnée pelvienne.

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.

Sujet de la thèse :

**Changements phénotypiques des cellules endothéliales au cours du développement
des lésions radiques pulmonaires**

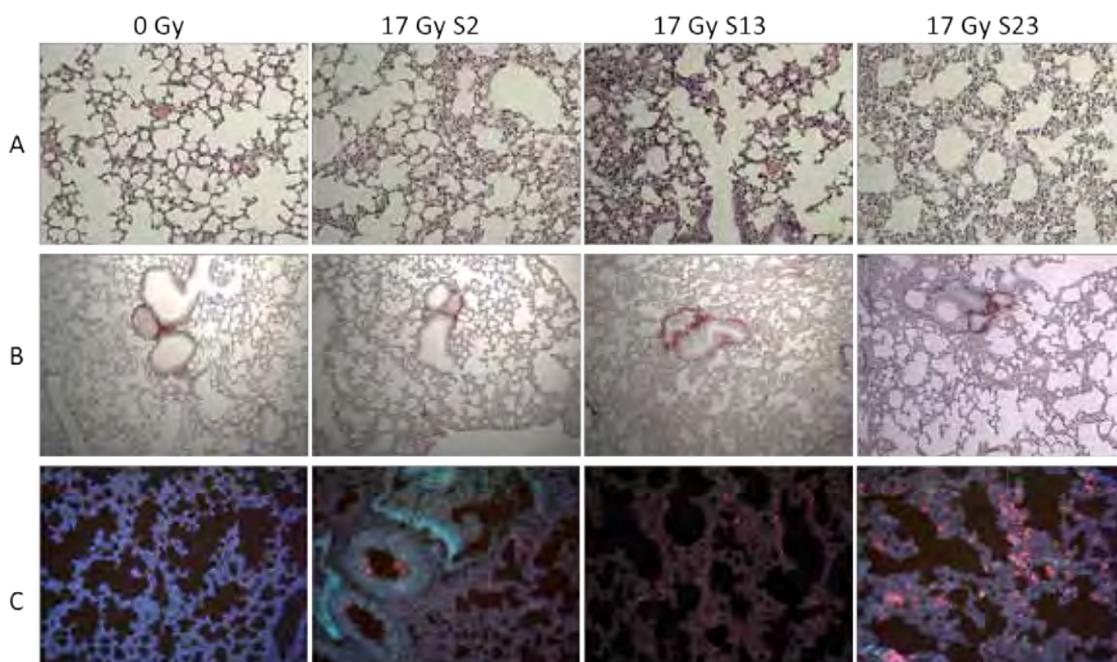
Doctorant :	Jérémy LAVIGNE
Date du début de la thèse :	20/10/2014
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/L3R
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Agnès François - IRSN
Tuteur de thèse :	Agnès François
Ecole doctorale :	ED 394 Physiologie, physiopathologie et thérapeutique - UPMC

L'utilisation de la radiothérapie thoracique peut induire le développement de pneumonies aiguës et de fibroses pulmonaires. Actuellement, aucune solution n'existe pour traiter efficacement ces lésions ou prévenir leur apparition. La dysfonction du système vasculaire est connue pour participer au développement de lésions au niveau des tissus sains. En particulier, le pool endothélial de PAI-1 (Plasminogen Activator Inhibitor-type 1) a été démontré comme impliqué dans le développement de la fibrose intestinale radio-induite grâce à l'utilisation de souris invalidées pour PAI-1 spécifiquement dans l'endothélium. Notre objectif est désormais d'explorer le rôle éventuel de PAI-1 dans l'apparition de la fibrose pulmonaire radio-induite.

Le modèle murin présentant une invalidation spécifique de PAI-1 dans l'endothélium est utilisé. Lors de l'irradiation, la totalité du thorax des souris est exposée à une dose unique de 17 Gy. Les poumons sont ensuite prélevés à 2, 13 et 24 semaines. Les souris floxées pour PAI-1 sont utilisées comme contrôle. Un système de *scoring* basé sur plusieurs critères histologiques est utilisé pour déterminer la sévérité des dommages pulmonaires radio-induits chez l'ensemble des animaux.

Ces premiers travaux montrent d'importantes modifications histologiques du parenchyme pulmonaire dans les semaines suivant l'irradiation, avec un épaississement des septas alvéolaires ainsi qu'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. Les résultats mettent 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, sans influencer la fréquence de la transition endothélium-mésenchyme. D'autre part, l'analyse de l'apoptose des cellules endothéliales et des pneumocytes de type II est en cours sur l'ensemble des échantillons. Enfin, les performances physiques des différents groupes de souris sont à l'étude pour tenter de mettre en évidence une corrélation entre les observations histologiques et l'impact sur la fonctionnalité de l'appareil respiratoire des animaux.

Contrairement aux résultats obtenus sur l'intestin, une invalidation de PAI-1 dans l'endothélium ne protège pas les animaux des dommages radiques pulmonaires. Des expérimentations sur des souris totalement invalidées pour PAI-1 sont en cours afin d'expliquer cette dualité.



Cinétique de l'apparition des lésions pulmonaires radio-induites à 2, 13 et 23 semaines après une exposition unique de la totalité du thorax des souris à 17 Gy. (A) Coloration Hématoxyline Eosine Safran. (B) Coloration du collagène au Rouge Sirius. (C) Marquage des macrophages avec un anticorps anti-CD68

Sujet de la thèse :

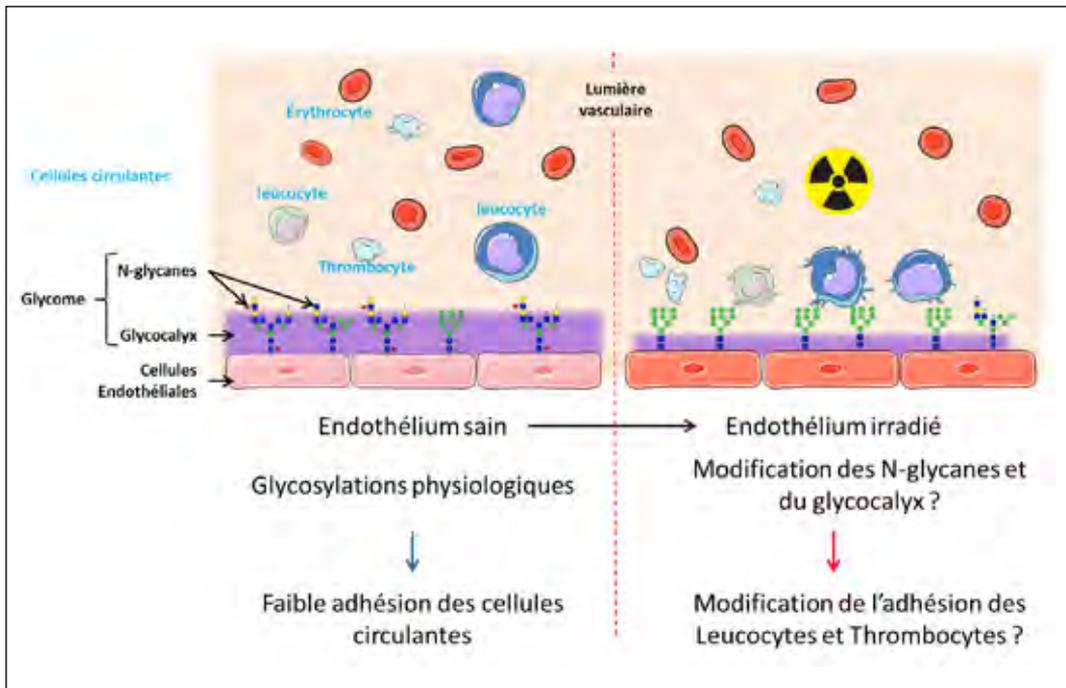
**Modifications radio-induites du glycome de l'endothélium vasculaire :
implications sur le recrutement des cellules circulantes et sur la thrombose
vasculaire dans le tissu irradié**

Doctorant :	Cyprien JAILLET
Date du début de la thèse :	01/10/2013
Laboratoire :	PRP - HOM/SRBE/L3R
Financement de thèse :	IRSN - EDF (ROSIRIS)
Directeur de thèse :	Olivier Guipaud - IRSN & Fabrice Allain (USTL - UGSF)
Tuteur de thèse :	Olivier Guipaud
Ecole doctorale :	Paris 6 UPMC/ED 394 Physiologie Physio-pathologie Thérapeutique

Utilisée dans le traitement des cancers, la radiothérapie entraîne cependant des risques d'effets secondaires au niveau des tissus normaux environnants. Les rayonnements ionisants causent des modifications du réseau vasculaire qui participent à la progression des lésions radio-induites à court et long termes. L'endothélium vasculaire est le tissu clé de la réponse inflammatoire. Activées par les rayonnements ionisants, les cellules endothéliales vasculaires participent au recrutement des cellules immunitaires. En contexte inflammatoire et d'athérosclérose, des modifications de la glycosylation des protéines membranaires des cellules endothéliales permettent d'adresser spécifiquement des leucocytes au tissu lésé. L'inflammation affecte également le glycocalyx, une structure saccharidique et protéique recouvrant les cellules endothéliales dont l'épaisseur diminue dans les maladies inflammatoires chroniques comme l'athérosclérose. L'ensemble de ces glycosylations, appelé glycome, constitue donc une cible thérapeutique privilégiée pour moduler une réponse inflammatoire chronique et pathologique. Comme l'irradiation induit une dysfonction de l'endothélium, nous avons voulu savoir si le glycome endothélial en était modifié et si ces modifications avaient des conséquences fonctionnelles.

Pour ce faire, des cellules endothéliales primaires (HUVEC) ont été irradiées à 20 Gy et étudiées entre 1 et 21 jours après l'exposition. Une analyse transcriptomique ciblée effectuée sur 84 gènes de glycosylation a démontré que l'irradiation altère l'expression de 33 de ces gènes. Les sucres exprimés à la surface des cellules ont été étudiés en cytométrie de flux et microscopie par marquage avec des lectines fluorescentes qui se lient à des motifs glycaniques spécifiques. La spectrométrie de masse a permis d'affiner cette caractérisation. Il en résulte que les structures N-glycaniques hautement mannosylées sont surexprimées après irradiation. Aussi, le dosage de l'acide uronique suggère une diminution de l'épaisseur du glycocalyx après irradiation. Des études structurales en microscopie électronique pourraient venir confirmer ces dosages. Enfin, des analyses de transcriptomique et de caractérisation par les lectines sont également menées *in vivo* chez la souris et l'homme. L'ensemble des résultats montrent l'existence de modifications du glycome des cellules endothéliales *in vitro*.

Pour approfondir, il s'agit maintenant d'explorer les conséquences fonctionnelles de ces changements sur les phénomènes d'adhésion leucocytaire et plaquettaire *in vitro* et *in vivo*.



Sujet de la thèse :

**Biothérapie du traitement des effets secondaires de la radiothérapie ;
étude préclinique du traitement des effets secondaires des radiothérapies
abdomino-pelvienne par les Cellules Souches Mésoenchymateuses
chez le rat Sprague-Dawley dans un modèle d'irradiation fractionnée pelvienne**

Doctorant :	Benoît USUNIER
Date du début de la thèse :	03/09/2013
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LR2I
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Marc Benderitter - IRSN
Tuteur de thèse :	Alain Chapel
Ecole doctorale :	UPMC/ED 394 : Physiologie, physiopathologie et thérapeutique

La radiothérapie est utilisée dans 60% des thérapies de cancers solides. Elle peut conduire à des complications tardives aux tissus sains dans le champ d'irradiation, notamment des fibroses. La radiothérapie abdomino-pelvienne est la plus fréquente. Elle induit des fibroses du colon et du rectum. Les traitements actuels sont palliatifs. Un nouveau traitement par thérapie cellulaire a permis de traiter quatre patients développant de graves séquelles suite à un surdosage de radiothérapie abdominale. Il sera suivi par un essai clinique chez 12 patients développant des complications des radiothérapies.

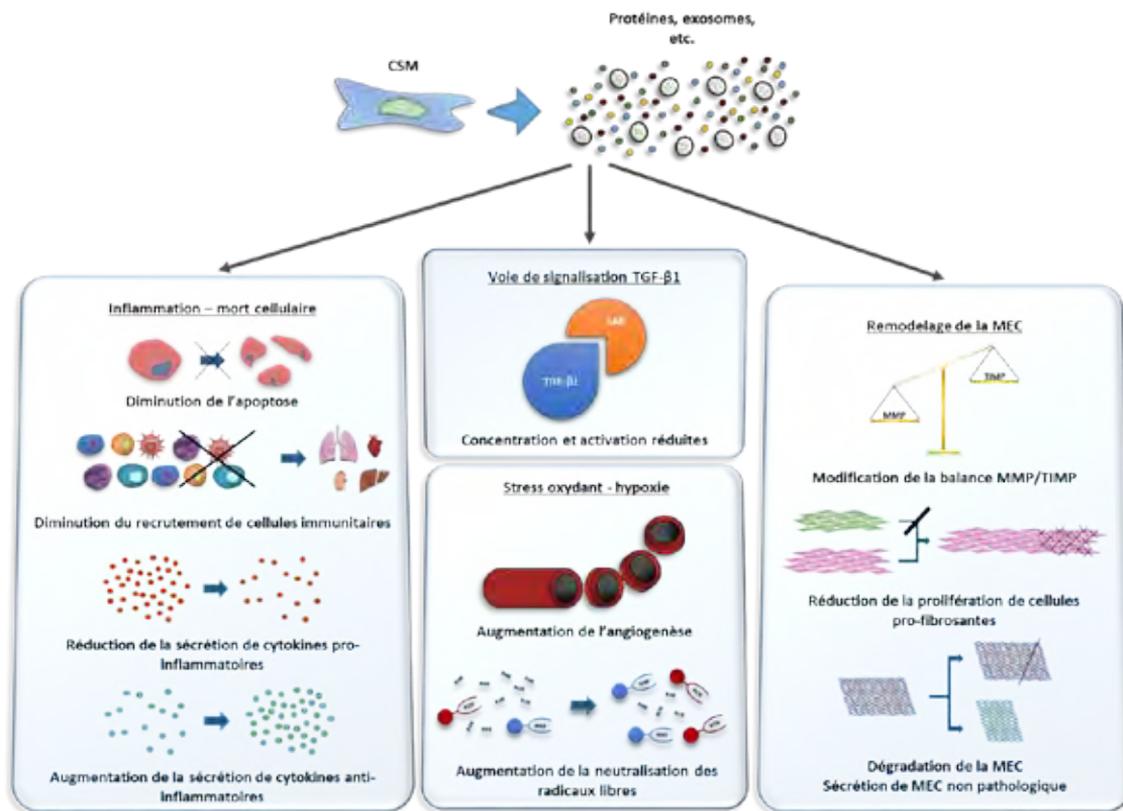
En parallèle de ces essais cliniques, cette thèse a pour objectif de caractériser l'effet des Cellules Souches Mésoenchymateuses (CSM) sur la fibrose colique radio-induite suite à une irradiation abdomino-pelvienne. Une approche *in vitro* et *in vivo* permet d'évaluer les effets secondaires des CSM et de leur potentiel thérapeutique dans le cas des fibroses radiques.

Nous avons montré que, *in vitro*, la présence de CSM en coculture ou de leur milieu conditionné semble réverser l'acquisition d'un phénotype pro-fibrosant chez les principaux types cellulaires impliqués dans la fibrose colique.

In vivo, une irradiation colorectale à 29 Gy permet de produire, chez le rat Sprague-Dawley, un modèle de fibrose similaire à celle observée chez l'Homme. Les CSM ont été injectés par voie intraveineuse à différents temps après irradiation. L'étude des prélèvements après transplantation suggère l'absence d'effets secondaires des CSM dans ce contexte.

La comparaison des animaux transplantés aux groupes contrôles semble indiquer un potentiel anti-fibrosant des CSM. Les CSM agissent par différentes voies selon le timing d'injection. Sur la base des résultats obtenus, deux acteurs moléculaires ont été identifiés comme étant potentiellement responsables. La confirmation de l'implication de ces protéines est en cours, à la fois *in vitro* et *in vivo*.

Les résultats obtenus au cours de cette étude pourraient fournir une alternative aux protocoles de traitement actuels de la fibrose.



Hypothèses sur les effets des Cellules Souches Mésenchymateuses sur la fibrose

Il a été démontré que les CSM agissent via plusieurs voies pour diminuer la fibrose dans différents modèles. Leur potentiel immunomodulateur permet de diminuer l'inflammation. Elles inhibent la voie TGF-β1, au centre de la pathologie. Elles diminuent le stress oxydatif et favorise la formation de nouveaux vaisseaux. Enfin, les CSM participent au remodelage de la matrice extracellulaire. (CSM: Cellules Souches Mésenchymateuses ; MEC: Matrice ExtraCellulaire)

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**

Doctorant :	Lucie FOURNIER
Date du début de la thèse :	01/10/2014
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LEPID
Financement de thèse :	Bourse du Ministère de la recherche
Directeur de thèse :	Dominique Laurier - IRSN
Tuteur de thèse :	Klervi Leuraud
Ecole doctorale :	Paris-Saclay - EDSP

Afin de mieux caractériser les effets des expositions chroniques à de faibles doses et faibles débits de dose de rayonnements ionisants (RI), caractéristiques des expositions environnementales ou professionnelles, des études portant sur des travailleurs du nucléaire ont été mises en place dans différents pays. En France, la cohorte nationale des travailleurs du nucléaire regroupe plus de 59 000 agents statutaires du CEA, d'AREVA NC et d'EDF embauchés au moins un an avant 1994 et surveillés pour une exposition externe aux RI.

Les objectifs de cette thèse sont d'étudier la mortalité par cancer dans cette cohorte tout en participant à l'extension de son suivi jusqu'en 2013 et à l'élargissement de son périmètre par l'intégration des agents embauchés entre 1995 et 2003, ce qui permettra de bénéficier d'une puissance statistique accrue pour l'étude de la mortalité.

Lors d'un premier axe de ce travail de thèse, nous avons étudié l'impact de la prise en compte d'un indicateur de contamination interne dans les analyses exposition-risque entre décès par pathologies cancéreuses et exposition externe aux RI. Nous avons montré qu'au sein de la cohorte française des travailleurs du nucléaire, l'omission d'informations portant sur la contamination interne ne générerait pas de biais substantiel pour l'estimation du risque de mortalité par cancer en relation avec une exposition chronique externe aux RI.

La mise à jour de la cohorte française des travailleurs du nucléaire concerne aussi bien les données administratives et dosimétriques des travailleurs, que les données relatives aux statuts vitaux et aux causes de décès. L'acquisition et le traitement des données administratives et dosimétriques ont été effectués. Les données de mortalité sont en cours de traitement.

La mortalité au sein de la cohorte sera comparée à celle de la population française par le calcul de rapports standardisés de mortalité. Puis le lien entre mortalité et exposition professionnelle aux RI au sein de la cohorte sera étudié, en se basant sur des modèles en ERR. Enfin, les résultats seront interprétés par rapport à leur intérêt en santé-travail et en radioprotection, et mis en perspective avec les autres cohortes de travailleurs du nucléaire en cours.

Sujet de la thèse :

Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chroniques de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application aux mineurs d'uranium

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

En épidémiologie des rayonnements ionisants, les expositions radiologiques disponibles sont très souvent entachées d'erreurs de mesure. Ignorer ces erreurs de mesure dans l'analyse d'une relation exposition-risque peut biaiser l'estimation de l'effet d'intérêt et l'incertitude d'estimation associée menant à des conclusions potentiellement erronées.

L'objectif de la 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 radiologique.

Une approche hiérarchique bayésienne, connue pour sa souplesse et sa pertinence pour la prise en compte d'erreurs de mesure, a été tout d'abord développée pour étudier l'association entre l'exposition au radon et la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs français. Un modèle probabiliste complexe a été construit permettant de combiner de multiples sources d'incertitude dont un mélange d'erreurs de mesure de type Berkson et classique ainsi que des facteurs modifiants potentiels. Un algorithme de Metropolis-Hastings a été implémenté pour mener l'inférence bayésienne du modèle proposé.

Une étude par simulation confirme que l'approche développée permet une diminution substantielle du biais induit par les erreurs de mesure. Sur les données de la cohorte, on observe une légère augmentation du risque de mortalité par cancer du poumon associé à l'exposition au radon après la prise en compte des erreurs de mesure. Le facteur modifiant le plus influent est la période d'exposition.

Dans de futures analyses, la performance de l'approche hiérarchique bayésienne sera comparée aux méthodes fonctionnelles fréquentistes classiques et l'impact d'une mauvaise spécification de l'incertitude sur les vraies expositions sera étudié. Comme les erreurs de mesure d'exposition contribuent aux incertitudes inhérentes au calcul de la dose absorbée au poumon, une réflexion sera menée afin d'adapter l'approche

proposée pour combiner modèles d'erreurs de mesure, modèles dosimétriques, et modèles dose-risque afin de rendre l'estimation du risque de cancer du poumon radio-induit la plus précise possible. Enfin, si le temps le permet, l'approche proposée sera adaptée afin d'estimer l'impact sanitaire corrigé des erreurs associées aux poussières d'uranium et aux rayonnements gamma auxquels sont également exposés les mineurs d'uranium.

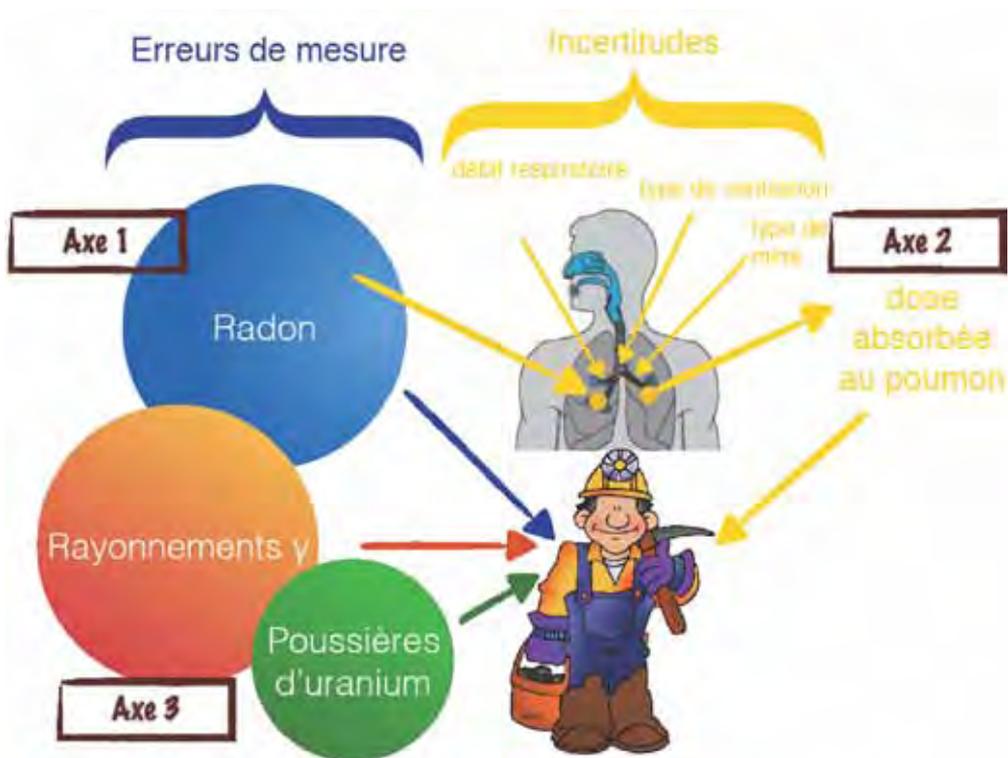


Figure 1. Les 3 axes de recherche de la thèse

➤ Mercredi 23 mars

10h25

Salle Bretagne

SESSION PARALLÈLE**Viellissement des installations & méthodes d'interpolation****Président : Gauzelin BARBIER,**

Responsable mission, stratégie et programme.
Direction de la stratégie, du développement
et des partenariats (DSDP).

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.

Lionel BICHET, Prise en compte des mécanismes de transports dans la fissuration des matériaux hétérogènes : application à la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires.

Ahmedou SIDI, Etude de la dégradation de polymères constitutifs de câbles contrôle commande en ambiance 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.

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.

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 - EXP/SES/BEGC
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Jean-Michel Torrenti (IFSTTAR)
Tuteur de thèse :	Georges Nahas
Ecole doctorale :	Sciences pratiques - ED 285, ENS - Cachan

Les réactions de gonflement font partie des pathologies du béton. Ces pathologies peuvent être attribuées à deux types de réactions chimiques : la Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alkali-Granulats (RAG).

Ces réactions dans leur phase de développement conduisent à la mise en traction du béton et à la création de fissures dans les ouvrages atteints par ces pathologies. Dans les ouvrages nucléaires, l'éventualité d'apparition de ces phénomènes ne peut pas être écartée. Ce risque doit être étudié d'autant plus que le prolongement de la durée de vie des installations est envisagé. 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).

Ces délais rendent difficiles les actions de R&D sur ces pathologies et limitent les possibilités des programmes expérimentaux. Parmi les solutions pratiquées dans les laboratoires de recherche, l'une consiste à utiliser des protocoles d'essais à vieillissement accéléré mis au point sur des éprouvettes ou des échantillons extraits par carottage.

Dans le cadre de la problématique décrite ci-dessus, on se propose d'étudier les méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons en vue de les extrapoler à l'échelle des ouvrages.

Les bétons qui seront étudiés dans le cadre de cette thèse sont similaires ou équivalents aux bétons utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil nucléaires, en particulier des enceintes de confinement et des radiers des réacteurs nucléaires.

L'étude portera sur l'adaptation des protocoles d'essais à vieillissement accéléré sur éprouvette à des structures représentatives d'un ouvrage réel. La taille de ces structures, les conditions utilisées pour le développement accéléré des pathologies, sont les deux principaux thèmes de cette thèse. La validation de la méthode utilisée

sera notamment effectuée par des observations au MEB et des analyses par tomographie. Cette dernière méthode permettra de caractériser la microstructure des matériaux cimentaires et son évolution (porosité, fissuration, nouveaux hydrates...) consécutive au développement de la RSI et de la RAG. Cette technique non destructive permettra également de suivre l'évolution temporelle de ces pathologies sur des images 3D d'éprouvettes.

En complément, des études en laboratoire et sur carottes extraites des structures seront menées afin de comprendre les mécanismes réactionnels pouvant permettre de traiter les bétons et arrêter les réactions.



Figure 1. Béton dégradé par la RSI

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

Doctorant :	Eric DELAUME
Date du début de la thèse :	06/11/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LPTM
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Loïc DARIDON Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil - MIST
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES
Ecole doctorale :	I2S - Université de Montpellier - ED 166

Afin d'anticiper les effets du vieillissement des centrales électronucléaires, l'IRSN effectue des recherches avancées sur le vieillissement du béton (enceinte de confinement) et des composants métalliques (cuve, internes de cuve, générateur de vapeur). Les problématiques liées au vieillissement des matériaux peuvent être abordées à l'aide de méthodes micromécaniques développées dans le cadre de l'analyse des tenues des gaines de combustible lors de transitoires accidentels, au sein du laboratoire commun MIST (IRSN & Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de Montpellier (UMR5508)). L'approche basée sur des *Modèles de Zone Cohésive Frottante* (MZCF) permet l'étude fine de l'initiation, de la propagation de multi fissures ainsi que des phénomènes post ruptures (contact, frottement, cicatrisation, etc). Cependant, les temps de calcul sont élevés comparés aux modèles continus plus classiques.

L'objectif de la thèse est de réduire les temps de calculs liés à l'approche MZCF, tout en conservant la même précision. La stratégie adoptée est l'adaptation de la discrétisation en espace dans les zones d'intérêt à l'aide de techniques de raffinement local adaptatif : au cours du calcul, le maillage est raffiné dans les zones d'intérêt suivant un indicateur. L'indicateur de raffinement envisagé ici est fourni par la méthode d'*Eigen-erosion* car peu coûteuse numériquement. La méthode de raffinement de maillage choisie est 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).

Dans un premier temps, une étude a été menée sur le couplage de la méthode d'*Eigen-Erosion* et le raffinement CHARMS avec un critère géométrique, pour différents types d'éléments (voir figure). Dans un deuxième temps, le raffinement adaptatif a été implémenté dans le logiciel *Xper* et sa validation est en cours. Dans un troisième temps, une fois le critère de raffinement choisi, le raffinement adaptatif sera associé à la méthode d'*Eigen-Erosion* afin d'optimiser au mieux le temps d'un calcul (i.e. sans perte de qualité de la solution).

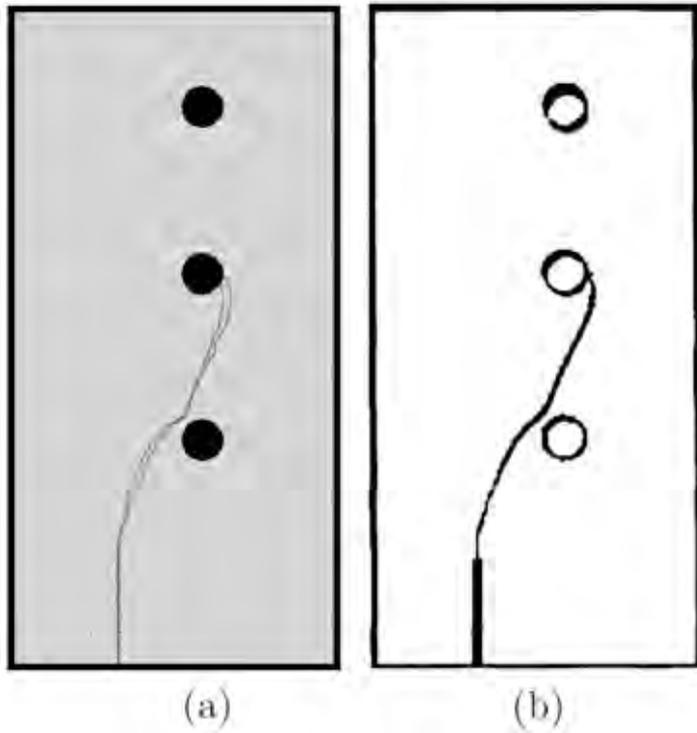


Figure : faciès de rupture d'une poutre trouée, chargée en flexion trois points, obtenu : (a) par processeurs, (b) expérimentalement. La fissure bleu est obtenue avec un maillage fin uniforme en 14H (1 087 710 mailles), et en rouge celle obtenue avec un maillage raffiné dans la zone d'intérêt en 1H (195 976 mailles).

Sujet de la thèse :**Mécanismes de transports dans la fissuration des matériaux hétérogènes :
application à la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires**

Doctorant :	Lionel BICHET
Date du début de la thèse :	01/10/2013
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LPTM
Financement de thèse :	Université de Montpellier
Directeur de thèse :	Yann MONERIE
	Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil - MIST
Tuteur de thèse :	Frédéric PERALES
Ecole doctorale :	I2S - Université de Montpellier - ED 166

Les propriétés du béton constituant l'enceinte de confinement d'un REP peuvent évoluer sous l'effet de pathologies liées au vieillissement du matériau. Les mécanismes de vieillissement dans ce milieu résultent notamment de transferts couplés de chaleur et de masse au sein du matériau. A l'échelle mésoscopique, celui du Volume Élémentaire Représentatif (VER), les dégradations peuvent être modélisées par des approches de type Zones Cohésives, couplées à des modèles de transport d'espèce en solution et la diffusion thermique.

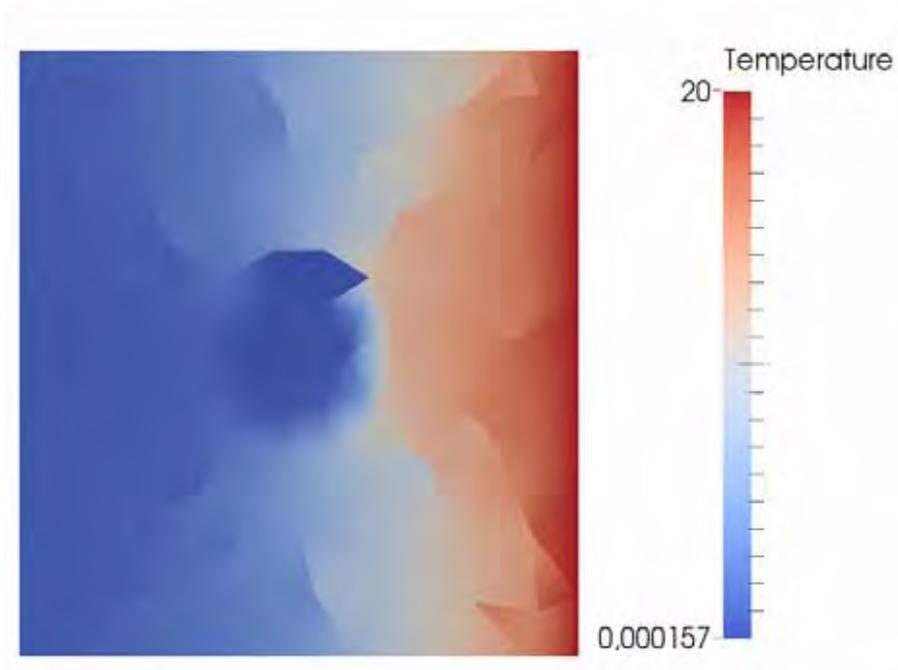
La thèse vise à proposer une résolution numérique du problème thermomécanique couplé dans un milieu hétérogène fissuré.

La première année de la thèse a été consacrée à une bibliographie de modèles thermo-mécaniques en milieu poreux. Les modèles de Lewis et al. consistent à moyenniser les équations bilans (masses, enthalpie et quantité de mouvement) sur l'ensemble du VER. En première approximation, les phénomènes peuvent être modélisés par des équations de transports moyennés: lois de Fick pour le transport d'espèce en solution et lois de Fourier pour la description de la diffusion thermique.

Dans le cadre de la thèse, la mise en œuvre numérique repose sur une approche multi-corps reliés par des lois d'interactions enrichies (zones cohésives thermiques). La seconde année a ainsi été consacrée d'une part à l'écriture d'un modèle couplé de l'équation de la chaleur dans le formalisme MZCF et d'autre part à son implémentation et sa validation dans le logiciel Xper.

L'objectif de la dernière année de thèse est une étude fine de la fissuration d'un béton d'enceinte de confinement ayant subi un vieillissement chimique sous chargement thermomécaniques (conditions accidentelles). Un VER sera ainsi généré avec un pré-endommagement au niveau des interfaces ciment/granulat. Un calcul thermomécanique représentatif sera ensuite effectué.

Le taux d'endommagement moyen (nombre de MZCF dégradée/nombre de MZCF initialement saine) en fonction de la température par zone de l'éprouvette pour plusieurs VER sera notamment étudié et permettra de déterminer l'influence de défauts, représentant les conséquences de vieillissement chimique de type Réaction Sulfatique Interne, sur la fissuration et la perméabilité du milieu.



Champ de température dans un composé matrice/granulat pré-dégradé sur sa partie supérieure

Sujet de la thèse :

**Etude de la dégradation radiolytique de polymères
constitutifs de câbles contrôle commande K1 en ambiance nucléaire**

Doctorant :	Ahmedou SIDI
Date du début de la thèse :	02/12/2013
Laboratoire :	PSN - RES /SEREX/L2EC
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Agnès RIVATON/Université de Clermont Ferrand
Tuteur de thèse :	Juliette COLOMBANI
Ecole doctorale :	Clermont Ferrand I - Sciences fondamentales - ED 178

Le vieillissement des matériaux et des structures des réacteurs du parc électronucléaire français est un sujet d'intérêt majeur compte tenu des futures demandes de l'exploitant EDF de prolongation d'exploitation des tranches actuelles. Les câbles électriques placés à l'intérieur du bâtiment réacteur doivent assurer leur fonctionnalité pendant toute la durée d'exploitation du réacteur dans les conditions normales, accidentelles et post accidentelles. Les travaux de recherche présentés ici concernent les isolants de câbles contrôle-commande sans halogène (SH) «qualifiés K1». La fonctionnalité de ces câbles présente généralement peu de variation avant une dégradation importante du polymère constitutif, c'est pourquoi la recherche d'indicateurs précoces de dégradation par radiooxydation fait l'objet d'études axées sur les caractéristiques mécaniques et chimiques des polymères. Les phénomènes de thermooxydation sont également pris en compte, la situation accidentelle (APRP) pouvant entraîner une rapide élévation de température de l'environnement du câble.

L'objectif du présent travail est de pouvoir identifier les modifications lentes et irréversibles de l'isolant d'intérêt (matériau fortement formulé) et de matériaux modèles (contenant les composants principaux constitutifs de l'isolant) à trois échelles distinctes :

- i) au niveau moléculaire en analysant l'évolution de la structure chimique du matériau ;
- ii) au niveau de l'architecture macromoléculaire en identifiant les processus de coupure de chaînes/réticulation et les conséquences sur la cristallinité ;
- iii) au niveau des propriétés physico-chimiques en mesurant l'évolution des propriétés mécaniques. L'objectif final est d'établir des corrélations entre ces différents niveaux d'analyse.

Dans un premier temps, le lien entre l'évolution de la structure chimique du matériau et celle de ses propriétés mécaniques au cours d'un vieillissement thermique a été mis en évidence. Il a été ensuite montré que l'ajout des charges dans le matériau modifie profondément la microstructure ainsi que les conséquences du vieillissement aux différents niveaux d'analyse. Si la taille des volumes libres au sein du composite avant vieillissement est une partie de l'explication, l'interface polymère/charge pourrait aussi être une zone de dégradation privilégiée. Sur la base de mesures DRX couplées à des analyses PDF (Pair Distribution Function), il semblerait que cette réactivité supplémentaire puisse être explicitée par une modification de la charge, et plus probablement de sa surface, au cours de l'étape de réticulation du matériau avant vieillissement.

... / ...

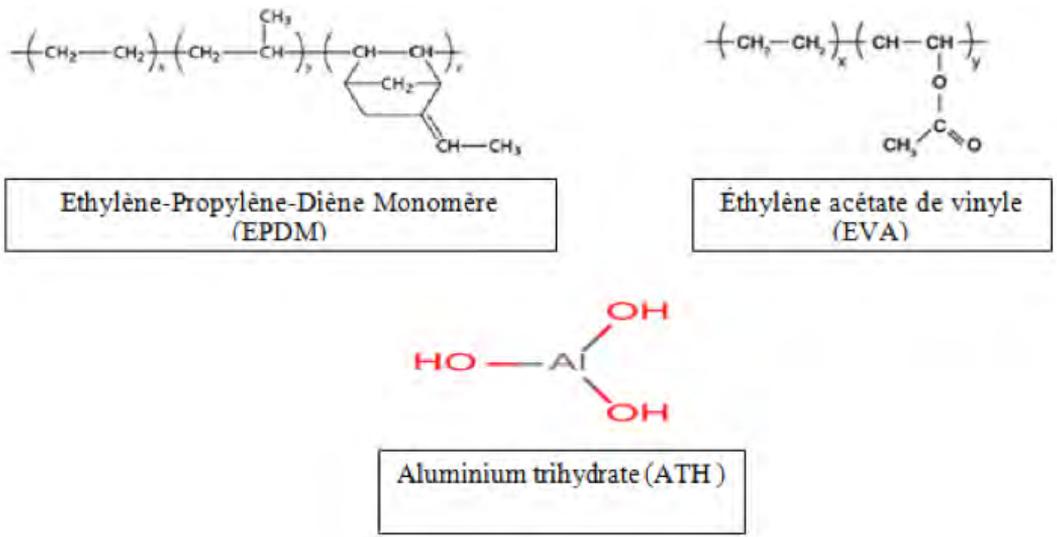


Figure 1. Structures chimiques des composants du matériau

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**

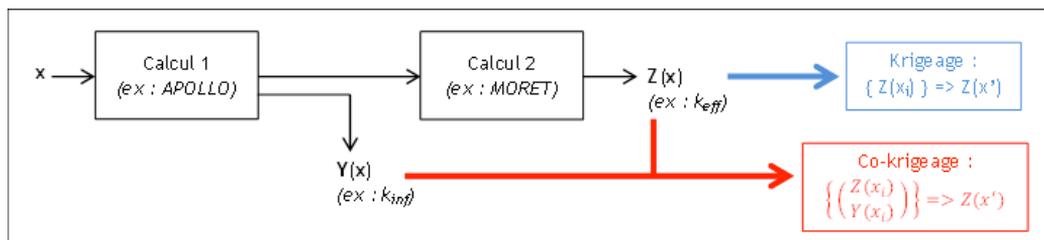
Doctorant : Nicolas GARLAND
Date du début de la thèse : 20/10/2014
Laboratoire : PSN - EXP/SNC
Financement de thèse : IRSN
Directeur de thèse : Rodolphe Le Riche - EMSE
Tuteur de thèse : Yann Richet
Ecole doctorale : Mines Saint-Etienne - Sciences, Ingénierie, Santé

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 Laboratoire de Neutronique du Cycle 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 les simulations à tester de manière itérative pour identifier la configuration la plus pénalisante pour la sûreté (en exploitant une méta-modélisation de la réponse du code de calcul).

La spécificité de l'enchaînement des codes de calcul sera directement exploitée dans les nouveaux algorithmes en utilisant une méta-modélisation « boîte grise » qui exploitera les informations physiques intermédiaires.

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 (fini), qui n'est actuellement pas utilisée dans les algorithmes utilisant les méta-modèles « boîte noire ».



L'exploitation de ces informations intermédiaires de la chaîne de calcul doit conduire à une meilleure méta-modélisation, accroissant ainsi l'efficacité des algorithmes. 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 peut potentiellement se permettre de ne pas effectuer le calcul MORET qui ne devrait conduire qu'à un k -eff également faible.

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 :

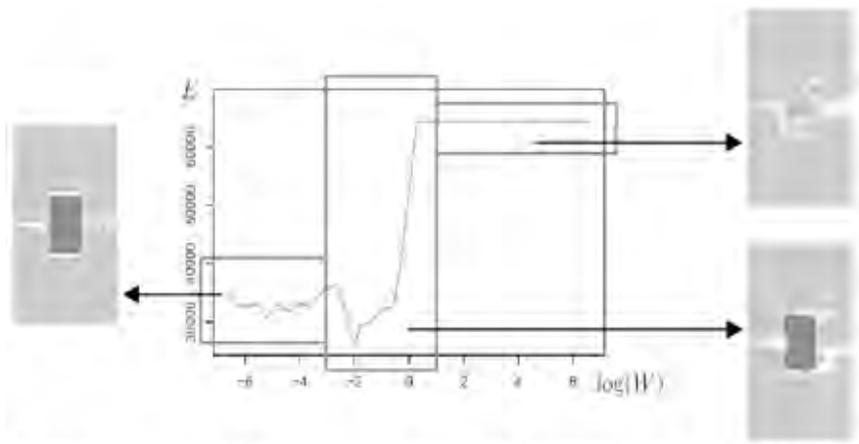
Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire

Doctorant :	Sébastien MARMIN
Date du début de la thèse :	20/10/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LIMAR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Jacques Liandrat - Ecole centrale de Marseille ; David Ginsbourger - Université de Berne
Tuteur de thèse :	Jean Baccou
École doctorale :	AMU - Mathématiques et informatique - ED 184

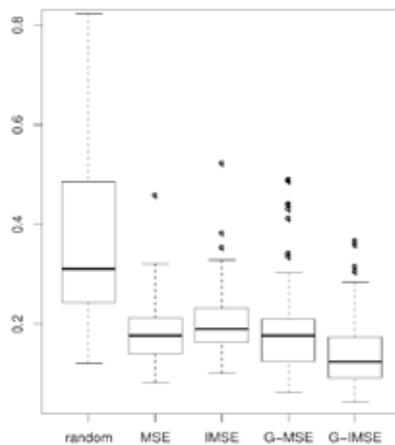
Ce travail concerne la prise en compte des incertitudes dans les analyses mécaniques en sûreté nucléaire à l'aide de codes de calcul complexes. Il s'agit par exemple de savoir si les variations des paramètres des codes ne peuvent pas faire basculer le système vers un comportement différent de celui de référence. En pratique, le nombre de paramètres, et les incertitudes qui leur sont associées sont souvent trop importants pour explorer l'ensemble de variation des données d'entrée. Afin de réduire le coût de calcul, des techniques de planification d'expériences numériques basées sur les statistiques spatiales peuvent être alors mises en œuvre pour effectuer de nouvelles simulations dans les zones pertinentes. Elles reposent sur l'approximation de la relation entrée/sortie du code par un modèle, ici un processus gaussien. Puis les expériences sont choisies de façon à optimiser une fonction coût (critère). Toutefois, l'hypothèse usuelle de modélisation stationnaire peut conduire à des prédictions peu fiables si le comportement de la réponse est très hétérogène en espace, situation rencontrée dans beaucoup d'études en sûreté nucléaire.

L'objectif de la thèse est donc de développer, d'analyser et d'appliquer de nouvelles méthodes de planification basées sur une modélisation non-stationnaire. Pour cela, une première classe de processus gaussiens déformés adaptée à l'apprentissage de fonctions avec une transition brusque a été construite. Puis deux nouveaux critères (G-MSE, G-IMSE) en planification d'expériences séquentielles pour l'exploration de fonctions avec de fortes variations ont été proposés. Ils sont basés sur le gradient du processus gaussien modélisant. Leur application sur un premier cas test issu des études IRSN de fissuration mécanique ont montré une amélioration significative de l'apprentissage de la surface de réponse dans la zone d'intérêt par rapport à des critères classiques.

Les développements futurs concernent d'abord la construction d'une classe plus générale de modèles non stationnaires et de critères de planification pour prendre en compte différents types d'hétérogénéités dans la réponse d'un code. Pour cela, nous envisageons de coupler la modélisation par processus gaussiens et les méthodes en ondelettes issues du domaine du traitement d'images. De plus, plusieurs applications sur des cas tests mécaniques en plus grande dimension sont prévues.



Exemple d'évolution d'une sortie d'intérêt (énergie de rupture) issue des études de fissuration mécanique d'un matériau bi-phasé



Erreur de prédiction pour différents critères de planification d'expérience séquentielle

➤ Mercredi 23 mars

15 h 30

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PARALLÈLE**Stockage des déchets**

Président : Didier GAY,
Adjoint au Directeur Déchets et géosphère (PRP - DGE).

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

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

Philippines LALAN, Impact de la température sur la géochimie et la diffusion aux interfaces béton/argile dans le stockage des déchets radioactifs.

Sophie GROUSSET, Mécanismes de corrosion sur le long terme en milieux anoxiques - étude physico-chimique des phases soufrées à travers une approche triple : analogues archéologiques, essais *in situ* à la SET et essais en laboratoire.

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

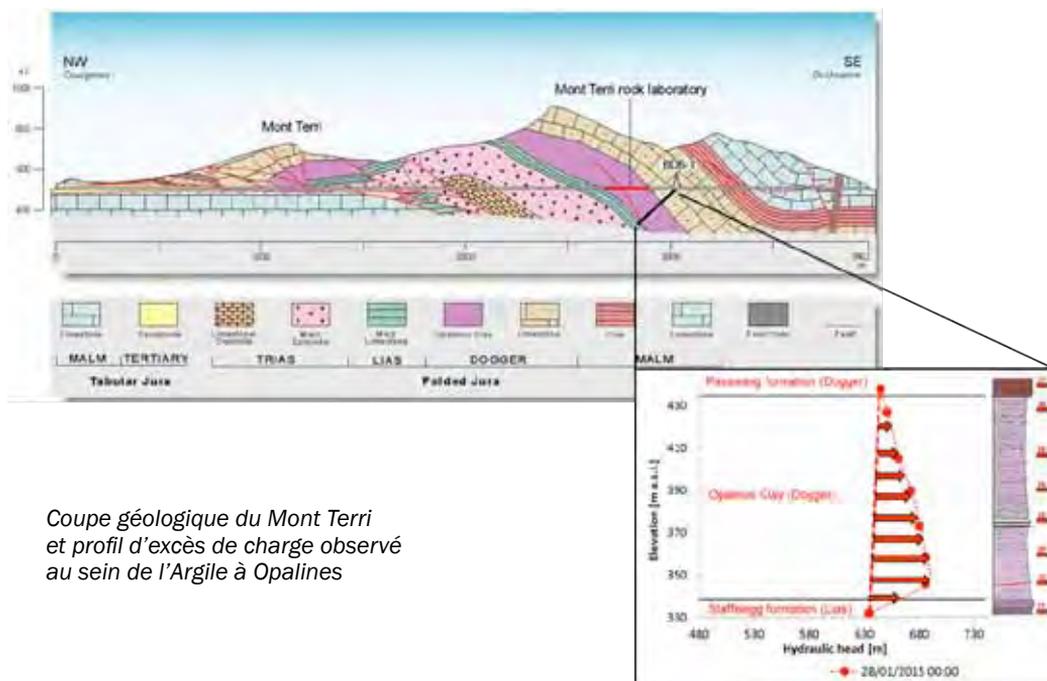
Doctorant :	Catherine JI YU
Date du début de la thèse :	20/10/2014
Laboratoire :	PRP-DGE/SRTG/LETIS
Financement de thèse :	Cofinancement par le consortium du Mont Terri
Directeur de thèse :	Julio GONÇALVÈS - CEREGE
Co-directeur de thèse :	Jean-Michel MATRAY
Ecole doctorale :	Université d'Aix-Marseille / ED 251 Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement

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 à Tournemire sur une autre argilite 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*, consistant en un forage incliné long de 250 mètres et équipé d'un système hydraulique multi-obturateur.

Le premier volet des travaux a permis d'acquérir certains 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 son encaissant aquifère. Un profil de perméabilité a été obtenu à partir de données pétrophysiques en utilisant une loi de type Poiseuille. Les coefficients d'emménagement spécifique ont été estimés avec un modèle hydro-mécanique basé sur les déformations poro-élastiques engendrées par les marées et des essais hydrauliques *in situ* ont été réalisés. 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 jusqu'à présent au niveau du laboratoire souterrain du Mont Terri mais montrent aussi des différences liées à la position du forage hors de toute zone perturbée par l'excavation de galeries.

Le volet expérimental sera suivi d'une phase de modélisation de la charge hydraulique en couplant les phénomènes susceptibles de générer un écoulement d'eau, en régime permanent ou transitoire. La modélisation des profils d'halogénures servira notamment à valider l'évolution paléohydrogéologique du site. Enfin, nous apprécierons l'importance relative de la convection sur la diffusion en calculant les nombres de Péclet. 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.



Coupe géologique du Mont Terri et profil d'excès de charge observé au sein de l'Argile à Opalines

Sujet de la thèse :**Numerical and experimental characterizations of the hydro-mechanical behavior of a heterogeneous material - powder /pellet bentonite mixture**

Doctorant :	Agustín MOLINERO GUERRA
Date du début de la thèse :	30/10/2014
Laboratoire :	PRP-DGE/SRTG/LETIS
Financement de thèse :	IRSN et AFCN
Directeur de thèse :	Yu-Jun CUI, Ecole des Ponts ParisTech
Tuteur de thèse :	Nadia MOKNI
Ecole doctorale :	Paris Est - Sciences, Ingénierie et Environnement - ED 351

The MX80 powder/pellets mixture is one of the candidate sealing plugs used in deep radioactive waste disposal because of its low permeability, high swelling capacity, favourable properties with respect to radionuclide retention and operational advantages such as *in situ* compaction, which make it different from other sealing materials (pre-compacted bricks of bentonite/sand mixture, where a technological void is generated). It is therefore essential to understand its hydro-mechanical behavior when assessing the overall repository safety. In this context, the French Institute for Radiation protection and Nuclear Safety (IRSN) has launched the SEALEX project (SEALing performance EXperiments) in which this work has been conducted.

Once the initially heterogeneous unsaturated MX80 bentonite powder/pellet mixture (80/20 in dry mass) is in place, it will be subjected to coupled hydro-mechanical loadings: hydration due to the infiltration of pore water from the natural barrier and mechanical confinement resulting from the engineered barriers. The present work focuses on the investigation of the hydro-mechanical behavior of the material at different scales.

At the microscopic scale, the material is studied by several techniques (mercury intrusion porosimetry - MIP, microfocus X-ray computed tomography and scanning electron microscopy - SEM observations). From MIP results, a typical bimodal distribution was found for both pellet and powder. However, a shifting of the mean diameter of micropores of a pellet was observed at suctions lower than 9 MPa. From μ -CT observations, a heterogeneity was revealed in the internal structure of the pellet: heterogeneous density distribution of the clay minerals and presence of several high density elements.

At the macroscopic scale, a small scale mock-up at a 1/10 scale of large *in situ* experiments conducted by IRSN in the framework of the SEALEX project was designed to study the HM behavior of the pellet/powder MX80 bentonite mixture. It consists in a stainless still cylindrical cell ensuring mechanical confinement and a hydraulic part enabling two-side saturation of the hosted sample (from the top and the bottom). Three types of sensors monitor the swelling behavior of the sample at several positions as well as relative humidity. Figure 1 presents the swelling pressure development over time. An anisotropic swelling behavior of the mixture is observed due to its complex structure.

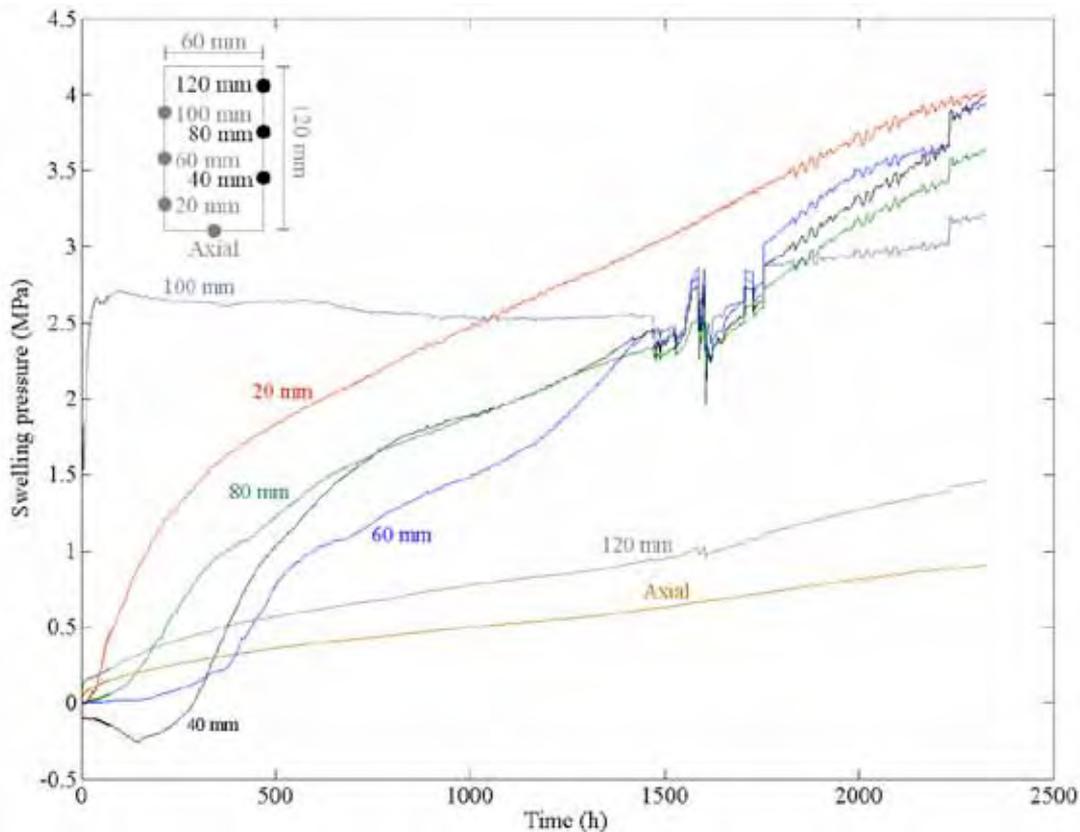


Figure 1. Swelling pressure development over time for all the sensors (the positions of the pressure sensors and the dimensions of the sample are indicated in the diagram)

Sujet de la thèse :

Impact de la température sur la géochimie et le transport diffusif aux interfaces
béton/argile dans le stockage des déchets radioactifs

Doctorant :	Philippines LALAN
Date du début de la thèse :	07/10/2013
Laboratoire :	PRP-DGE/SRTG/LETIS
Financement de thèse :	IRSN, BEL V
Directeur de thèse :	Laurent De Windt - Mines - ParisTech
Tuteur de thèse :	Alexandre Dauzères
Ecole doctorale :	Paris VI - Géosciences et ressources naturelles - ED 398

Le stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde est une question clé dans le secteur nucléaire en France. Dans le concept actuel, le milieu géologique, argileux, et les infrastructures de stockage doivent assurer le confinement des radionucléides. Leur mise en contact génère inévitablement des interactions et la présence des déchets, exothermiques, peut induire une température de l'ordre 70°C aux contacts entre la roche et les matériaux anthropiques. Dans ces conditions de température, le comportement des interfaces argile/béton demeure peu connu.

L'objectif de cette étude est de créer expérimentalement des interfaces pâte de ciment CEM I/argilite de manière à caractériser finement les évolutions minéralogiques, microstructurales et leur influence sur les propriétés diffusives des matériaux à 70°C afin de construire un modèle satisfaisant du comportement de ces interfaces à cette température. Préalablement, le comportement de la pâte de ciment CEM I lors d'une élévation de température de 20 à 70°C est étudié. Puis deux types d'essais sont effectués : des essais en cellule de diffusion de 2, 6 et 12 mois dédiés à la validation des modèles réalisés avec le code de transport réactif HYTEC ainsi que des essais en condition *in situ* dans le laboratoire souterrain de Tournemire en conditions plus représentatives du stockage profond.

Les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les premières simulations du système seront présentés. En plus des mécanismes classiquement observés, à l'interface, entre les deux matériaux, un ruban de tobermorite (silicate de calcium hydraté) se forme à laquelle, en condition *in situ* seulement, se mêle une zéolithe, ainsi que des silicates et aluminates de calcium hydratés. La porosité diminue également dans toute la zone altérée. Les essais en cellules permettent, de plus, d'avoir accès à l'aide de traceur, à l'évolution des propriétés diffusives de telles interfaces. Les simulations numériques réalisées reproduisent assez fidèlement les processus physico-chimiques observés expérimentalement mais l'extension de la perturbation est surestimée.



Cliché MEB de l'interface CEM I/argilite après 1 an : néoformations de prismes maclés caractéristiques de la phillipsite (zéolithe) et de silicates de calcium hydratés en nid d'abeille

Cette étude met notamment en évidence un manque de données en température sur les cinétiques de réaction, la stabilité des phases, les variations de porosité et les échanges cationiques dans un tel système. Sur le plan expérimental, les efforts se focalisent sur la description des évolutions de la microstructure et de son influence sur les propriétés diffusives afin de mieux contraindre les modèles numériques en vue d'améliorer la compréhension de telles interfaces en température.

Sujet de la thèse :

Utilisation de la composition isotopique du soufre pour l'étude de l'origine bactérienne ou inorganique des sulfures de fer- étude physico-chimique des phases sulfurées à travers une approche triple : analogues archéologiques, essais *in situ* et en laboratoire

Doctorant :	Sophie GROUSSET
Date du début de la thèse :	01/12/2013
Laboratoire :	PRP - DGE/SRTG/LETIS et LAPA (CEA)
Financement de thèse :	CEA /Andra/IRSN
Directeur de thèse :	Delphine Neff/CEA
Tuteur de thèse :	Alexandre Dauzères
Ecole doctorale :	UPMC/Ecole Doctorale Physique et Chimie des Matériaux

Cette étude est menée dans le cadre du projet de stockage des déchets radioactifs type haute activité (HA) en milieu géologique profond. Les options retenues prévoient l'utilisation de matériaux métalliques (chemisage et colis) pour une période de fonctionnement de mille ans. Leur résistance à la corrosion est donc un sujet d'étude important.

Or, des bactéries susceptibles de conduire à un phénomène de corrosion localisée sont observées dans l'environnement du stockage. Parmi celles-ci sont détectées des bactéries sulfato-réductrices pouvant conduire à la formation de sulfures de fer par réduction des sulfates. Or, des expériences menées en laboratoire semblent montrer que ce phénomène de réduction s'accompagne d'un fractionnement isotopique du soufre.

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'analyse isotopique du soufre pour la détermination de l'origine, bactérienne ou inorganique, des sulfures de fer observés au sein des couches de produits de corrosion formés à long terme sur des systèmes réels.

L'étude des sulfures de fer présents dans des échantillons archéologiques permet la mise au point d'une méthodologie d'analyse isotopique de surface adaptée aux échantillons réels corrodés sur le très long terme. Les techniques d'analyses spectrométriques ToF-SIMS et nanoSIMS sont particulièrement investiguées. L'étude des conditions d'acquisition et des méthodes de traitement des données ToF-SIMS est toujours en cours. En revanche, la méthodologie développée en nanoSIMS a déjà été appliquée à un échantillon issu des expérimentations « Corrosion des matériaux ferreux » menées au laboratoire de recherche souterrain de l'Andra à Bure (Meuse) ainsi qu'à un barreau de fer corrodé en cellule de percolation biotique au cours de la thèse de C. Chautard dédiée à l'étude des interactions fer/argile.

Par ailleurs, l'étude isotopique de coupons de fer corrodés en milieu carbonaté anoxique en présence ou en absence de bactéries permet de valider l'hypothèse « un fractionnement isotopique du soufre vis-à-vis de la source initiale en cet élément apparaît lorsqu'un métabolisme bactérien intervient lors de leur formation ». En effet, les analyses isotopiques réalisées en nanoSIMS sur les phases FeS_{1-x} et Fe_3S_4 formées ont confirmé l'existence d'un fractionnement isotopique du soufre allant de quelques pour mille à plusieurs dizaines de pour mille entre les sulfures biotiques et abiotiques.

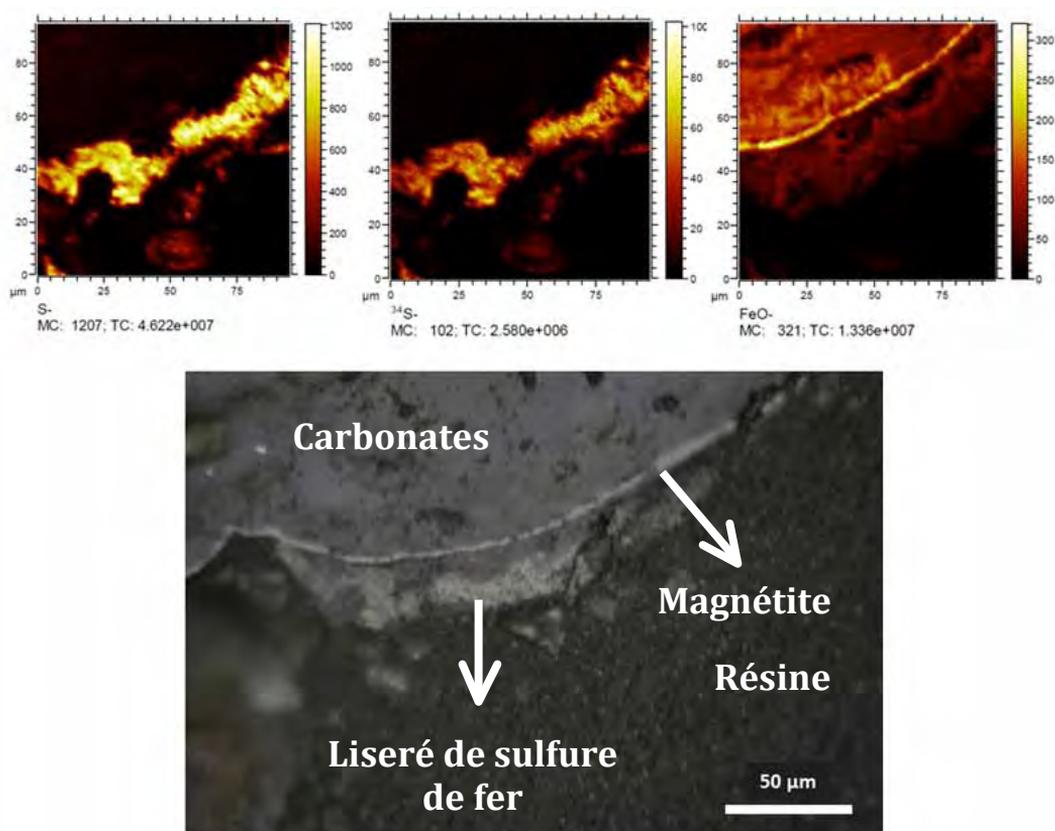


Figure 1. Image isotopique obtenue en ToF-SIMS mode BA-burst sur une section transverse du clou GL12-140-T1C provenant du site archéologique de Glinet (Normandie, France)

➤ Mercredi 23 mars

15h30

Salle Bretagne

SESSION PARALLÈLE**Explosion et incendie dans les installations nucléaires**

Présidente : Nabiha CHAUMEIX,
Directrice de recherche CNRS.
Institut de Combustion Aérothermique Réactivité
et Environnement d'Orléans.

David ALIBERT, Etude 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.

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

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

Miriam D'AMICO, Etude expérimentale et modélisation des explosions hybrides solides/solides : application au cas des mélanges de poussières graphite/métaux.

Sujet de la thèse :

Etude 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

Doctorant :	David ALIBERT
Date du début de la thèse :	01/10/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SA2I/LEF
Financement de thèse :	Université d'AIX-MARSEILLE (AMU)
Directeur de thèse :	Bernard Porterie - Aix-Marseille Université, CNRS IUSTI UMR 7343
Tuteur de thèse :	Mickaël Coutin
Ecole doctorale :	AMU/ED 353 : Sciences Pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique

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 donc 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. Il est donc 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 d'étudier expérimentalement et numériquement les effets du niveau d'oxygène sur ces paramètres, et donc sur le développement d'un feu.

Pour ce faire, un dispositif expérimental appelé CADUCEE (Controlled Atmosphere Device for Unburnt and Carbon Emission Evaluation) a été mis au point. 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 donc 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, en cours, sur un combustible solide (PMMA) a permis de montrer la dépendance des paramètres de combustion au niveau d'oxygène pour une taille d'échantillon donnée. D'autres tailles d'échantillons seront étudiées dans cette campagne afin de mettre en évidence l'effet d'échelle. Une seconde campagne expérimentale sur les combustibles liquides (heptane et éthanol) sera menée par la suite avec notamment un bac à niveau constant.

Enfin, une étude numérique sera réalisée sur les logiciels SAFIR (IUSTI) et ISIS (IRSN) et permettra de prendre en compte les effets de la sous-oxygénation sur les paramètres de combustion. Cette étude aura pour but, dans un premier temps, de comparer les résultats obtenus grâce aux codes de calcul avec ceux obtenus à l'aide de CADUCEE et, dans un second temps, d'améliorer ces codes avec une meilleure prise en compte de la sous-oxygénation.



Figure 1. Calorimètre à atmosphère contrôlée: CADUCEE

Sujet de la thèse :

Optimization of Passive Autocatalytic Recombiners with respect to gas phase ignition

Docteurant :	Aryadeep CHAKRABORTY
Date du début de la thèse :	03/11/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/B2EGR
Financement de thèse :	Forschungszentrum Juelich, Germany and IRSN
Directeur de thèse :	Hans-Josef Allelein, LRST, RWTH University, Aachen, Germany
Tuteur de thèse :	Dr. Ernst-Arndt Reinecke (Germany); Dr. Nicolas Meynet (France)
Ecole doctorale :	RWTH Aachen University, Germany

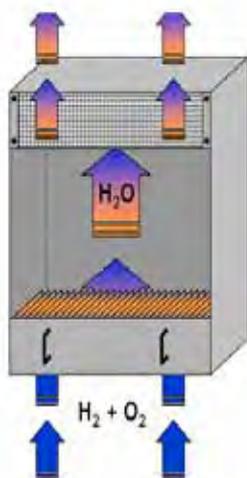


Figure 1. A PAR under operation

In case of a severe accident in a light water reactor, considerable amount of hydrogen and carbon monoxide may be produced due to various chemical reactions inside and outside the reactor vessel. The concentration of flammable gases inside the containment may exceed the flammability 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 France, recombiners aim 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.

PARs convert hydrogen and carbon monoxide into 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 (cf. Figure 1) 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 about PARs, especially by analysing the comprehensive database of OECD/NEA-THAI experiments in order to understand the mechanism of gas-phase ignition. Simultaneously, based on the findings of the analysis, dedicated experiments were performed in the REKO-1 facility at the hydrogen laboratory at JÜLICH to better understand the gas-phase ignition process. 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 second and the third year will be invested in the proposal and experimental demonstration of a new PAR design, and the adaptation of pre-existing codes (REKO-DIREKT and SPARK) to this new design.

Sujet de la thèse :**Analyse de propagation de flamme Hydrogène - Air - Vapeur en milieu confiné**

Docteurant :	Romain GROSSEUVRES
Date du début de la thèse :	03/11/2014
Unité (Direction/Service/Laboratoire) :	PSN - RES/SAG/B2EGR
Financement de thèse :	ANR MITHYGENE
Directeur de thèse :	Nabiha Chaumeix, CNRS Orléans
Ecole doctorale :	Ecole doctorale de l'université d'Orléans

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 la perte d'intégrité de l'enceinte 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. Les travaux de cette thèse visent à étudier la propagation de flammes hydrogène/air/vapeur en milieu confiné dans des conditions représentatives de cas d'accidents graves en réacteur à eau pressurisée. Les conditions d'accélération/stabilisation/extinction de flamme seront investiguées, notamment en étudiant les impacts de la température, de la concentration en vapeur d'eau et de la turbulence sur ces régimes de propagation.

Dans le but d'effectuer ces études, une nouvelle ENceinte d'ACCElération de Flamme (ENACCEF 2) va être installée au laboratoire ICARE. Ainsi, les travaux de cette première année de thèse ont principalement porté sur l'élaboration de ses plans ainsi que le matériel nécessaire aux futures études de propagation de flamme que cette enceinte permettra de réaliser. Un système PIV haute fréquence (Particle Image Velocimetry) a d'ores-et-déjà été installé et testé sur une installation existante au laboratoire. Ce dernier permettra l'étude de la vitesse des gaz frais en amont du front de flamme lors de sa propagation, et ainsi d'analyser l'interaction turbulence-combustion. Un chromatographe en phase gazeuse a également été mis en place pour l'analyse des gaz frais lors des futures études. Avant chaque expérience de propagation de flamme, l'analyse des gaz frais sera effectuée dans le but de vérifier leur concentration ainsi que l'homogénéité au sein de l'enceinte. Ces analyses seront aussi effectuées afin de vérifier la présence ou non d'hydrogène en fin d'expériences afin de caractériser finement les conditions pour lesquelles une extinction a été observée. Ainsi, les cas de combustion incomplète seront identifiés avec précision. Les calibrations pour les gaz d'intérêts ont été effectuées.

Au préalable des études de propagation de flammes hydrogène/air/vapeur au sein d'ENACCEF 2, les paramètres fondamentaux de ce type de flammes devront être investigués. En effet, pour caractériser la propagation d'une flamme dans un milieu où la turbulence n'est pas contrôlée, il est nécessaire de connaître certaines de ses grandeurs caractéristiques telles ses vitesses de flamme laminaire et turbulente, sa longueur de Markstein etc. Au cours de cette première année de thèse ont ainsi pu débutées les études de flammes laminaires en bombe sphérique. Egalement, en vue des études de flammes turbulentes au sein de cette même bombe sphérique, la caractérisation de la turbulence initiale contrôlée par des ventilateurs a été effectuée à l'aide d'un système PIV basse fréquence.

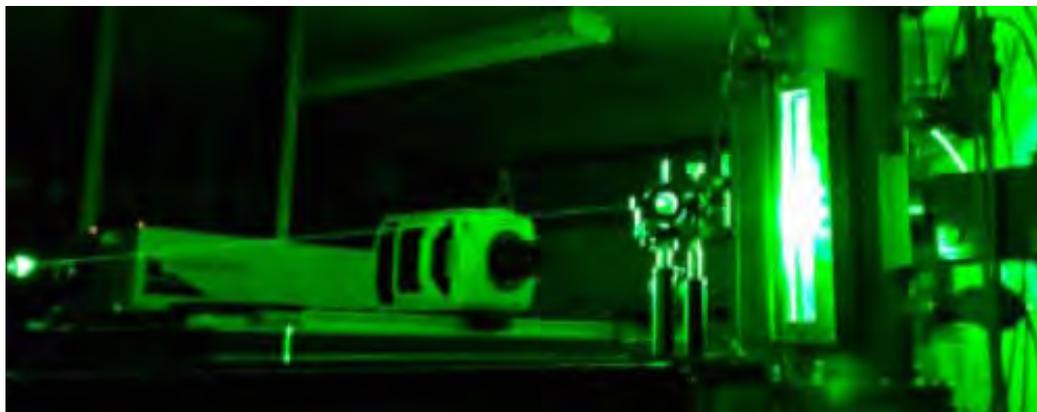


Figure 1. Système PIV Haute Fréquence à l'essai sur ENACCEF 1



Figure 2. Bombe sphérique permettant l'étude de flammes laminaires et turbulentes

Sujet de la thèse :

**Etude expérimentale et modélisation des explosions hybrides solides/solides :
application au cas des mélanges graphite/métaux**

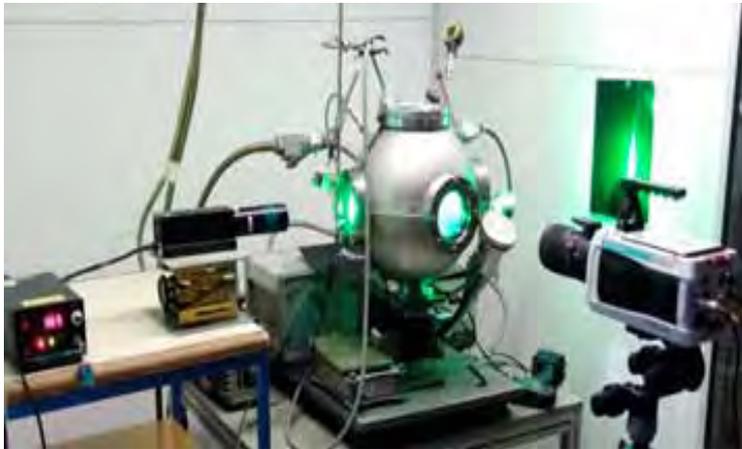
Doctorant :	Miriam D'AMICO
Date du début de la thèse :	16/10/2013
Laboratoire :	PSN - RES/SA2I/LIE
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Olivier Dufaud - LRGP Nancy
Tuteur de thèse :	Jean-Claude Latché
Ecole doctorale :	Université de Lorraine - Ressources, Procédés, Produits et Environnement RP2E - ED 410

L'occurrence de phénomènes explosifs liés à des mélanges constitués par du graphite de chemise et des métaux (spécifiquement du magnésium et du fer) ne peut pas être exclue lors des opérations de démantèlement des caissons réacteurs de la première filière nucléaire française, dite « UNGG » (Uranium Naturel Graphite Gaz), ou lors de la reprise et du conditionnement de déchets entreposés dans des silos. Mon travail de thèse vise à contribuer à l'évaluation de ce risque et des conséquences éventuelles, afin d'assurer la sécurité de ces processus.

Dans un premier temps, une étude expérimentale extensive du comportement explosif des poudres pures et de leurs mélanges a été réalisée. Elle a démontré que l'addition d'un deuxième solide métallique aux poussières de graphite modifie sensiblement aussi bien le comportement du mélange vis-à-vis de l'inflammation, en nuage et en couche, que ses caractéristiques d'explosivité. Cet effet est plus ou moins marqué selon le métal ajouté à cause des différences de propriétés physiques et de cinétiques réactionnelles des deux métaux : par exemple, la vitesse de montée en pression du graphite subit une augmentation de 340 %, si 30 %m. de magnésium est introduit, alors que la variation n'est que de 256 % avec le même pourcentage de fer.

La présence d'un deuxième solide influence également la turbulence. Afin d'obtenir l'évolution temporelle de l'intensité de la turbulence pour les poussières pures et pour leur mélanges, la technique de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) a été mise en œuvre dans une sphère similaire à celle standard d'explosion de 20 litres. Ces expériences ont été couplées avec des analyses de granulométrie réalisées *in situ* qui décrivent l'évolution temporelle de la taille des particules dans l'enceinte. Ces résultats ont permis de mettre en relation le temps de dispersion de la poussière dans l'appareil avec le niveau de turbulence initiale, la taille de particule qui prennent effectivement part au phénomène explosif et les caractéristiques d'explosivité du mélange.

Le mécanisme de transfert de chaleur par rayonnement de la flamme est également modifié lorsque le deuxième solide ajouté dans le mélange est un métal. Pour mieux comprendre cet aspect, des expériences complémentaires de propagation de flamme dans un tube vertical ont débuté. En parallèle, le développement d'un modèle de propagation de flamme a été poursuivi. Initialement limité aux poussières de graphite, il permettra d'obtenir les paramètres de sévérité de ce matériau (pression maximale atteinte et vitesse de montée en pression dans la sphère normalisée de 20 litres) ; il sera ensuite étendu au cas des mélanges hybrides.



➤ Mercredi 23 mars

17h35

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PARALLÈLE**Effet des faibles doses chez les organismes vivants****Président : Marc BABUT,**

Membre du comité de visite IRSN.

Laboratoire d'écotoxicologie, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.

Cécile DUBOIS, Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants : de l'ADN aux protéines.**Marie TRIJAU,** Etude à différentes échelles des mécanismes d'action toxique des radiations ionisantes chez *Daphnia magna*.**Laure GENIES,** Etude des transporteurs impliqués dans l'absorption racinaire et la translocation aux parties aériennes du césium chez *Arabidopsis thaliana*.**Yvan EB-LEVADOUX,** Identification des ligands biologiques de l'uranium dans les gonades de *Danio rerio* - Impact sur leur fonctionnalité.

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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Simon Galas - Université Montpellier
Tuteur de thèse :	Sandrine Frelon - Catherine Lecomte
Ecole doctorale :	Université de Montpellier ED 168 Sciences chimiques et biologiques pour la santé

L'exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants est une problématique environnementale majeure. Pour une même dose, les effets observés étant distincts entre les modes d'irradiation aigu et chronique, les mécanismes sous-jacents peuvent l'être également (processus adaptatifs/augmentation radiosensibilité). Il est donc nécessaire d'acquérir des données spécifiques aux effets/mécanismes moléculaires induits par une irradiation chronique. Les dommages à l'ADN et leur réparation ont fait l'objet de nombreuses études alors que les protéines, molécules fonctionnelles de l'organisme, beaucoup moins. Récemment il a été montré que l'oxydation des protéines (et notamment leur carbonylation) pouvait être critique. A l'état basal, cette modification post-traductionnelle irréversible peut être éliminée par le protéasome, lui-même complexe protéique.

Cependant, aucune étude n'a investigué les conséquences biologiques de la carbonylation après irradiation chronique ou après irradiation aiguë à des doses inférieures à 200Gy.

Les objectifs du projet de thèse sont de 1/Comparer les modes d'irradiations aigu et chronique en analysant les dommages aux protéines et leur prise en charge et de 2/Discriminer ces deux modes d'irradiation dans un contexte intégré, en liant d'autres effets moléculaires tels que les dommages à l'ADN, le statut redox cellulaire avec les dommages individuels du nématode *C. elegans* (reproduction).

Une des étapes préliminaires a été 1/de déterminer le niveau basal de protéines carbonylées chez le nématode sur différents stades de vie, puis 2/de définir la fenêtre cinétique d'étude de ces dommages, après irradiation aiguë (75Gy (ED50 reproduction) et 2.5Gy (dose finale chronique utilisée dans le laboratoire), et 3/d'établir un carbonylome. Analytiquement, les protéines carbonylées (PC) ont été dérivées avec un réactif spécifique, portant un fluorophore, puis séparées sur gel 1D et analysées par un scanner. L'analyse des protéines totales se fait en parallèle pour obtenir un signal PC/protéines totales.

Les résultats montrent 1/une carbonylation des protéines différentielle en fonction du cycle de vie du nématode (figure 1) et 2/une tendance à l'augmentation des protéines carbonylées à 3h post irradiation aiguë (75Gy et 2.5Gy). Il a donc été choisi de travailler

sur le stade Jeune Adulte (correspondant à la maturité sexuelle du nématode), et sur une fenêtre d'étude des PC à 3h post-irradiation aiguë. L'étude des carbonylomes (ensemble des protéines carbonylées) après exposition aiguë et chronique (2.5Gy) a ensuite pu être investiguée après dérivation des PC, séparation par électrophorèse 2D et analyse des signaux. 126 différents spots de protéines carbonylées ont pu être observés après irradiation aiguë à 2.5Gy entre les contrôles et les exposés. Une analyse par spectrométrie de masse des spots variants est en cours afin d'analyser la nature des protéines carbonylées dans nos conditions. Cette même analyse sera effectuée sur une irradiation aiguë multidose afin de caractériser la sensibilité de ce marqueur entre 0 et 200Gy et comparer les deux modes d'irradiation.

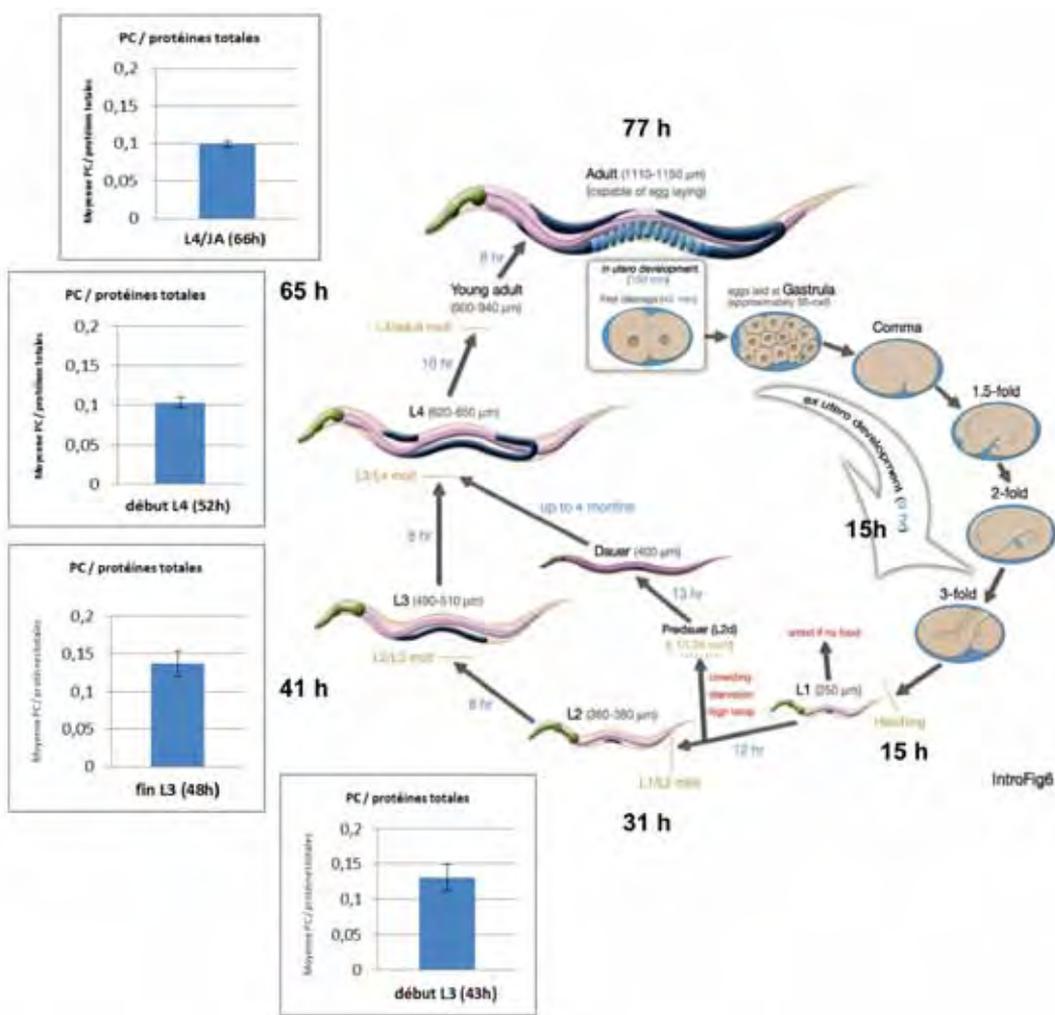


Figure 1

Histogrammes des niveaux de PC (ratio PC/Protéines totales) en fonction des différents stades de vie de *C. elegans* à 18°C (début de L3, fin de L3, début L4, et jeune adulte). Niveau basal de protéines carbonylées chez *C. elegans*.

Sujet de la thèse :**Etude à différentes échelles des mécanismes d'action toxique
des radiations ionisantes chez *Daphnia magna***

Doctorant :	Marie TRIJAU
Date du début de la thèse :	29/10/2014
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/LECO
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Jean-Christophe Poggiale - Université d'Aix-Marseille
Tuteur de thèse :	Frédéric Alonzo
Ecole doctorale :	Université Aix-Marseille, ED 251, Ecole doctorale des sciences de l'Environnement

L'évaluation du risque écologique lié à la présence de radionucléides dans l'environnement, lors du fonctionnement normal des installations nucléaires ou suite à un accident tel celui de la centrale de Fukushima, nécessite de mieux comprendre et d'anticiper les conséquences sur le long terme que les radiations ionisantes peuvent avoir sur les écosystèmes.

Dans ce contexte, l'objectif de ma thèse est de préciser les mécanismes liant les effets induits par les faibles doses de radiations gamma, de l'échelle de la molécule à celles de l'organisme et de la population dans des conditions environnementales réalistes.

Des études récentes chez le microcrustacé d'eau douce *Daphnia magna* ont mis en évidence l'apparition et l'accumulation d'altérations ADN lors d'une irradiation gamma ou d'une contamination à l'uranium appauvri sur plusieurs générations, avec des conséquences croissantes sur la survie, la croissance et la reproduction. Toutefois la nature des mécanismes sous-jacents demeure à éclaircir.

On sait que les radiations ionisantes induisent des modifications de la méthylation de l'ADN chez la souris, sans que cela n'ait jamais été confirmé chez les invertébrés. Les profils de méthylation de l'ADN font partie des mécanismes dits épigénétiques assurant la régulation de l'expression des gènes. Toute modification de ces mécanismes pourrait être transmise de générations en générations en absence du stress initial et conduire à l'apparition de phénotypes altérés.

Ma première expérience a donc visé à étudier l'apparition possible et la transmission de modifications épigénétiques d'une génération de daphnies exposée à leur descendance non exposée jusqu'à la troisième génération (F1, F2, F3). L'étude de ces modifications au-delà de la génération F2 est essentielle afin de déterminer leur héritabilité en l'absence d'exposition aux radiations ionisantes (Figure 1).

Les premiers résultats montrent à l'échelle de l'organisme une réduction significative de la fécondité chez les daphnies directement exposées à la plus forte dose, mais une réversibilité de ces effets chez leur descendance. Une analyse des profils de méthylation des daphnies exposées aux radiations et de leur descendance est en cours à l'aide d'une technique de séquençage bisulfite.

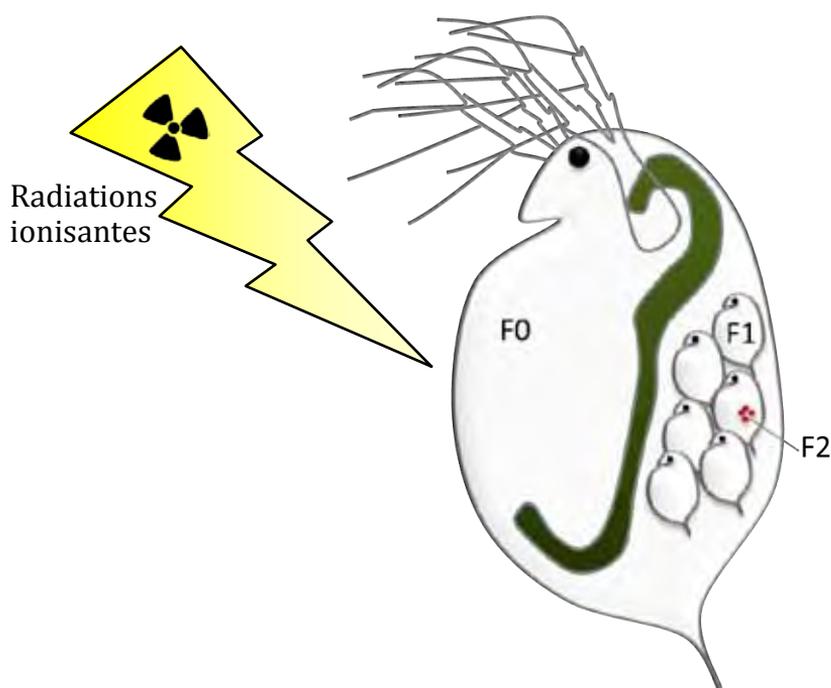


Figure 1. Trois générations de daphnies exposées aux radiations ionisantes.

La mère (F0), les embryons dans la chambre incubatrice (F1) et la lignée germinale des embryons (F2) ont été exposés simultanément aux radiations. Pour discriminer la transmission de modifications épigénétiques par les gamètes, il faut étudier ces modifications au-delà de la génération F2.

Sujet de la thèse :

Etude des transporteurs impliqués significativement dans l'absorption racinaire et la translocation aux parties aériennes du césium chez *Arabidopsis thaliana*

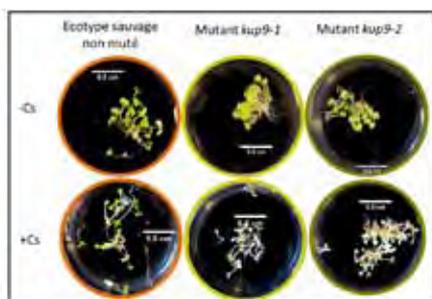
Doctorant :	Laure GENIES
Date du début de la thèse :	07/10/2013
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/L2BT
Financement de thèse :	IRSN/CEA
Directeur de thèse :	Alain VAVASSEUR - CEA
Tuteur de thèse :	Pascale HENNER
Ecole doctorale :	Université Aix-Marseille
	Ecole Doctorale des Sciences de la Vie et de la santé ED62

Cette thèse s'inscrit dans le projet ANR-RSNR DEMETERRES dont l'objectif est le développement d'outils pour la reconquête des territoires contaminés, notamment en radiocésium, après un accident nucléaire. Les capacités des plantes à ne pas transférer le Cs (safe food) ou à le concentrer dans leurs parties aériennes (phyto-rémediation) sont deux des pistes étudiées.

L'absorption de Cs est inégale entre espèces végétales : outre sa disponibilité dans le sol, le transport du Cs est également influencé par des propriétés propres à la plante. Les flux d'éléments chez les végétaux étant régulés par des transporteurs, l'objectif est ici d'identifier et de caractériser ceux qui sont significativement impliqués dans le transport du Cs.

Du fait d'analogie avec le K, le Cs est supposé emprunter les voies de transport dédiées à ce macronutriment majeur. Des expériences d'influx montrent que l'accumulation de Cs chez l'écotype sauvage est jusqu'à dix fois plus importante en condition de carence en K. La baisse de compétition entre le K et le Cs au voisinage immédiat des transporteurs n'explique pas totalement ce résultat. L'analyse de la littérature révèle que le transporteur HAK5, induit à faible niveau de K et perméant au Cs, participe également à cette augmentation du Cs absorbé quand la concentration en K est faible.

Le transporteur HAK5 appartient à la famille des KUP/HAK/KT. Des tests de toxicité du Cs chez des lignées mutées pour différents transporteurs de cette famille montrent que les mutants invalidés pour KUP9 (mutants notés *kup9*) sont plus sensibles au Cs. Cette hypersensibilité est liée à une plus grande accumulation de Cs, et ce quel que soit le niveau de K. Une corrélation possible avec l'induction de HAK5 n'a pas pu être vérifiée pour le moment.



Nous n'observons pas de modifications d'absorption du K chez ces mutants comparés à l'écotype sauvage : il serait donc possible de manipuler certains transporteurs pour moduler l'absorption de Cs sans que la nutrition potassique ne soit altérée.

Afin de mieux comprendre le rôle de KUP9 dans les flux de Cs, l'étude *in planta* de son schéma d'expression et de sa localisation cellulaire par l'utilisation de gènes rapporteurs est en cours.

Sujet de la thèse :**Identification des ligands biologiques de l'uranium dans les gonades de *Danio rerio*
Impact sur leur fonctionnalité**

Doctorant :	Yvan EB-LEVADOUX
Date du début de la thèse :	03/03/2014
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/LECO
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Ryszard Łobiński (LCABIE-CNRS Pau)
Tuteur de thèse :	Sandrine Frelon/Sandra Mounicou (LCABIE-CNRS)
Ecole doctorale :	Pau - Sciences exactes et de leurs applications - ED 211

Inscrit dans un contexte de radio-écotoxicologie, le travail de thèse a pour objet la spéciation de l'uranium dans les gonades de poissons zèbres afin de donner des clés de compréhension de la reprotoxicité de l'uranium, observée lors d'expériences précédentes au laboratoire (ENVIRHOM). La méthodologie sera ensuite extrapolée à des gardons, vivant naturellement dans un plan d'eau contaminée, et les cibles de l'U seront comparées.

Pour ce faire, deux stratégies analytiques complémentaires ont été choisies : l'approche métallomique qui vise à étudier les complexes uranium-protéines et l'approche protéomique qui consiste en l'étude comparée de l'expression des protéines de poissons témoins et contaminés.

La première année a été consacrée à i) la génération de la banque d'échantillons, avec des conditions biologiques et d'expositions contrastées, ii) au choix et à l'adaptation du protocole d'extraction non dénaturante des complexes uranium-protéine, iii) l'étude *in vitro* de molécules chimiques potentiellement chélatantes utilisées dans des protocoles d'analyse et iv) la détermination de la bioaccumulation de l'uranium dans les organes du poissons zèbre. Cette dernière a notamment permis de montrer un effet de dépuratation à l'issue de la reproduction.

La deuxième année a été dédiée à l'optimisation des méthodes d'analyses avec i) l'adaptation des protocoles protéomiques à la gonade, ii) l'analyse non dénaturante par chromatographie d'exclusion stérique couplée à la spectrométrie de masse élémentaire (SEC-ICP SFMS) et iii) des développements analytiques pour une séparation non dénaturante des complexes uranium-protéine en fonction du pH (OGE).

Les résultats de la SEC-ICPMS ont montré que l'uranium se lie majoritairement à un ensemble de protéine de masse autour de 40kDa quelles que soient les conditions d'expositions et de reproduction. Ce pic est cependant moins abondant pour les femelles reproduites (figure ci-dessous, fraction n°3). Les analyses par OGE indiquent que l'uranium se complexe principalement avec des protéines de pI entre 7 et 8, ce qui pourrait être cohérent avec la vitellogénine (pI=7.3), protéine abondante, richement phosphorylée et donc bonne candidate à la complexation.

Les prochaines expérimentations viseront à identifier plus précisément les protéines candidates à la complexation de l'U et si possible observer ces complexes par spectrométrie de masse moléculaire (ESI FTMS). Pour ce faire, des couplages de méthodes séparatives (OGE x SEC) et des développements analytiques supplémentaires (spectrométrie de masse non dénaturante) seront menés.

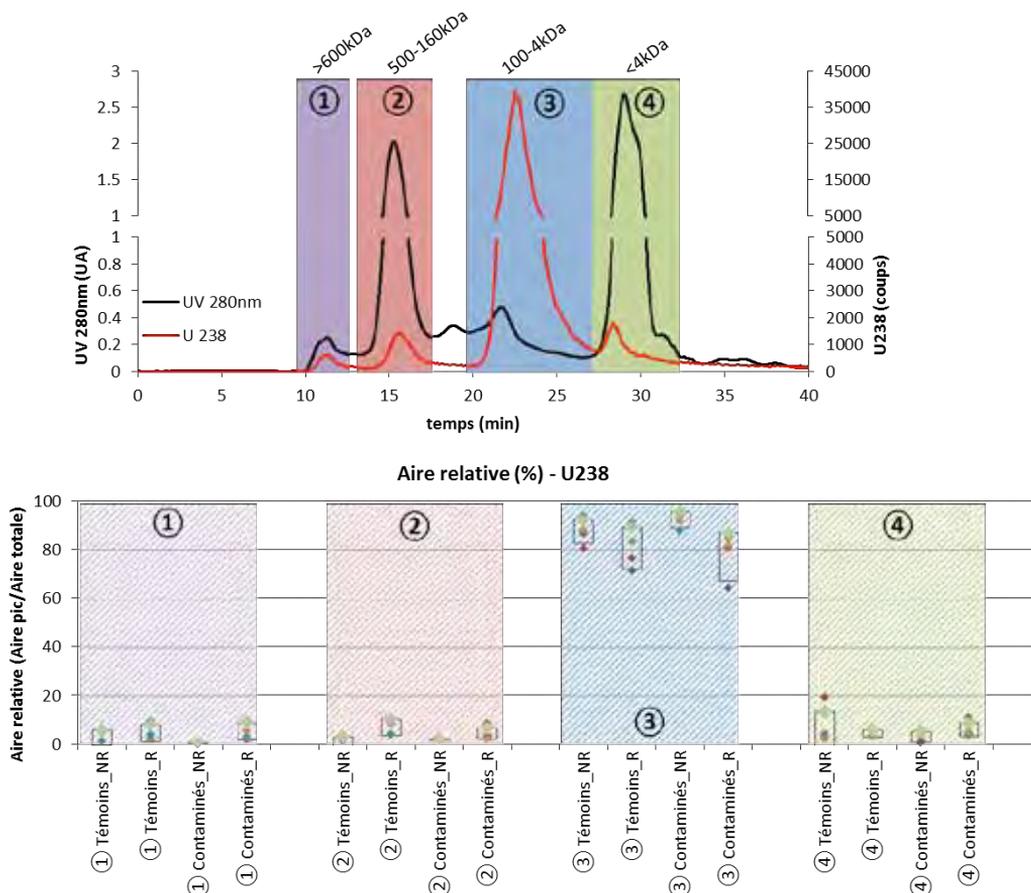


Figure: en haut, couplage SEC-ICP SFMS: chromatographie liquide non dénaturante de complexes uranium-protéines couplé à la spectrométrie de masse élémentaire haute résolution.

En bas, étude comparée de la répartition des complexes en fonction de la contamination et de la reproduction.

Liste des abréviations

U : uranium, SEC-ICPMS : couplage chromatographie d'exclusion stérique et spectrométrie de masse à secteur magnétique avec ionisation par torche à plasma, OGE : focalisation isoélectrique hors gel, pl : point isoélectrique, ESI FTMS : spectromètre de masse orbitrap avec ionisation par électrospray.

➤ Mercredi 23 mars

17h35

Salle Bretagne

SESSION PARALLÈLE**Rejets dans le réacteur en situation accidentelle
& piégeage des aérosols**

Présidente : Valérie FEVRE NOLLET,
Maitre de Conférence à l'Université de Lille.
Laboratoire de PhysicoChimie des Processus de Combustion
et de l'Atmosphère.

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

Dorel OBADA, Evaluation de rejets moyen-terme en situation
accidentelle grave d'un réacteur à eau pressurisée :
étude expérimentale de la revolatilisation de dépôts de produits
de fission (Cs, I, Ru).

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

Charlène MOULIN, Etude du piégeage des iodures radioactifs
(I₂ et ICH₃) par des adsorbants poreux dans différentes
conditions de fonctionnement.

Sujet de la thèse :

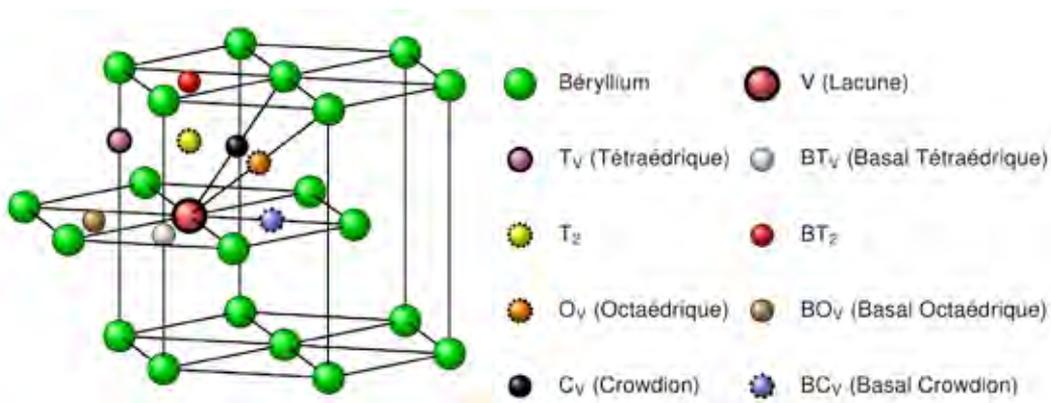
Contribution à l'étude du comportement du tritium dans le béryllium (contexte ITER)

Doctorant :	Laura FERRY
Date du début de la thèse :	15/10/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse :	IRSN/région PACA
Directeur de thèse :	Yves FERRO - PIIM - Université de Marseille
Tuteur de thèse :	François VIROT - Marc BARRACHIN
Ecole doctorale :	Aix-Marseille Université/Sciences Chimiques - ED 250

Le béryllium est utilisé comme matériau de première paroi dans la chambre à vide de l'installation de fusion expérimentale ITER. Les parois en interaction directe avec le plasma, constitué de deutérium et de tritium, peuvent piéger une partie du combustible qui peut alors diffuser dans le matériau. Du point de vue de l'analyse de sûreté, l'importance d'étudier le tritium piégé dans le béryllium et sa désorption en fonction de la température est double. Il s'agit d'évaluer l'efficacité des dispositifs internes à la chambre à vide mis en œuvre par l'exploitant pour limiter l'inventaire en tritium durant le fonctionnement nominal et de prédire le comportement du tritium en cas d'accident de perte de confinement de la chambre à vide.

Bien que de nombreuses données expérimentales aient été acquises dans le passé, les processus élémentaires à l'origine du comportement du tritium dans le béryllium sont encore méconnus. L'objectif principal de cette thèse est d'étudier, par le biais de méthodes *ab initio* basées sur la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT), le comportement du tritium dans le béryllium (chemins de diffusion, barrières énergétiques associées au piégeage et à la désorption). Tout d'abord, toutes les positions interstitielles qui pourraient être potentiellement occupées par le tritium dans la structure hexagonale compacte du béryllium ont été étudiées. Il en résulte que les sites interstitiels les plus énergétiquement favorables pour le tritium sont de symétrie octaédrique et basale tétraédrique. L'addition de plusieurs atomes de tritium, jusqu'à 5 unités dans une lacune, reste énergétiquement favorable. Le chemin de diffusion du tritium le plus favorable dans le béryllium, que ce soit le long du plan basal ou perpendiculaire à celui-ci, se fait entre une position basale tétraédrique et une position octaédrique avec une énergie de migration de 0,39 eV en accord avec les données publiées précédemment dans la littérature. Il a ensuite été montré qu'au voisinage d'une lacune, la position basale tétraédrique est la plus favorable. Enfin, le profil énergétique autour d'une monolacune a été obtenu, permettant d'identifier deux chemins de migration préférentiels du tritium vers la lacune avec des énergies d'activation de piégeage (0,2 à 0,4 eV) et de dépiégeage (1,3 à 1,5 eV). Ces nouvelles données pourront être introduites dans le modèle de résolution d'équations couplées de diffusion et de réaction développé à Jülich pour l'interprétation de spectres de désorption (TDS).

Pour des quantités importantes de tritium, la présence d'hydrure de béryllium (BeT_2), qui reste un composé largement méconnu, est possible, sous forme de poussières. La deuxième année portera essentiellement sur la détermination des propriétés thermodynamiques et sur l'étude des surfaces d'hydrure de béryllium.



Structure hexagonale compacte du béryllium avec les différents sites de piégeage possibles du tritium

Sujet de la thèse :

Evaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un réacteur à eau pressurisée : étude expérimentale de la revolatilisation de dépôts de produits de fission (Cs, I, Ru)

Doctorant :	Dorel OBADA
Date du début de la thèse :	01/11/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SEREX/L2EC
Financement de thèse :	ANR MiRE
Directeur de thèse :	Laurent Gasnot, Université Lille 1, PC2A UMR 8522
Tuteur de thèse :	Anne-Cécile Grégoire Anne-Sophie Mamede, Université Lille 1, UCCS UMR 8181
Ecole doctorale :	Université de Lille 1, Ecole Doctorale Science de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (SMRE)

Ce travail de doctorat s'inscrit dans la 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 précédents sur cette thématique se sont focalisés sur la re-vaporisation du césium à partir de dépôts de CsOH ou de CsI. Aucune étude ne s'est intéressée à la re-vaporisation d'espèces iodées. Ainsi, les objectifs de ce travail sont d'identifier les paramètres physicochimiques qui influencent le phénomène de re-vaporisation d'iodures métalliques, de quantifier les rejets moyen-terme et surtout d'établir la spéciation des espèces re-vaporisées, notamment la forme chimique des espèces iodées.

Le travail expérimental engagé depuis un an s'est focalisé sur la re-vaporisation de dépôts de CsI depuis des surfaces représentatives du circuit primaire en cas d'accident grave (acier 304L). La démarche retenue est la suivante : des coupons d'acier 304L sont oxydés sous vapeur d'eau avant d'être mis en œuvre dans un réacteur approprié pour y déposer par impaction des aérosols de CsI. Les coupons sont ensuite analysés par thermogravimétrie dans des conditions opératoires clairement définies afin d'évaluer la perte de masse représentative du processus de re-vaporisation. Finalement, les échantillons sont analysés par spectrométrie de masse (ICP-MS) ainsi que par différentes techniques d'analyse de surface (XPS, ToF-SIMS) afin de caractériser chimiquement le phénomène.

Les résultats obtenus jusqu'à présent ont montré que l'iode déposé se re-vaporise intégralement, et ceci quelles que soient les conditions expérimentales. Le comportement du Cs diffère de manière significative : même si l'état de surface initial et le gradient de température de re-vaporisation n'ont aucune influence sur son relâchement, l'atmosphère de re-vaporisation influence fortement le processus. Ainsi, sous vapeur d'eau, un relâchement intégral du Cs est observé tandis que sous air 10-30% du Cs n'est pas re-vaporisé. Les analyses de surface ont montré que le Cs non re-vaporisé forme des composés avec le Cr (Cs_2CrO_4 et $Cs_2Cr_2O_7$) présent en surface de l'alliage métallique.

Afin de compléter l'étude, les perspectives à moyen terme sont de développer un nouveau banc expérimental qui permettra la détection d'espèces iodées gazeuses.



*Figure 1. Appareil d'analyse thermogravimétrique (droite)
couplé à un générateur de vapeur d'eau (gauche)*

Sujet de la thèse :

**Theoretical study of iodine aerosols chemical reactivity in severe accident conditions
for a nuclear power reactor**

Doctorant :	Houssam HIJAZI
Date du début de la thèse :	Octobre 2014
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Jean-François Paul - UCCS Lille 1
Tuteur de thèse :	Laurent Cantrel
Ecole doctorale :	Lille 1 - Sciences de la Matière du Rayonnement et de l'Environnement SMRE - ED 104

The PhD subject comes in support to the modelling of the chemical behavior of iodine aerosols in severe accident conditions, because it has been shown that CsI aerosols deposited on surfaces, are rapidly and almost entirely oxidized into gaseous molecular iodide. This potential source of gaseous iodide has to be considered in iodide Source Term evaluation. At that time the experimental information are limited to CsI, and in practice the source of iodide aerosols which can reach the nuclear containment building is much more complex (multi-component aerosols formed with Ag, Cs, Cd, B etc.)

The main objective is to study, at the molecular scale, the mechanisms of molecular iodide formation from CsI aerosol in various environments using quantum chemical calculation with VASP software. Some calculated parameters (thermodynamics properties and kinetics) should be confronted to the experimental data. Based on the chemical mechanism determined, it will be easier to make some extrapolations to other metallic iodide aerosol or to consider more complex aerosols than CsI.

To start the reactivity of the surface is studied in gaseous phase, proposing the reaction mechanism leading to the formation of gaseous I₂.

Formation of iodide from the CsI aerosol cannot happen without any oxidant. A one electron oxidant such as OH° is not sufficient as the I₂ formation require the transfer of 2 electrons from the I⁻ anion. The most probable mechanism involves at least the action of two OH°. This conclusion has been drawn by studying the energetics of different reaction pathways.

The reaction mechanism shown in Figure 1 (the energies indicated are the reaction energy from the previous step to the next step) is the most probable one, since it doesn't contain steps any highly endothermic steps. The calculation of the activation energies of all steps is ongoing.

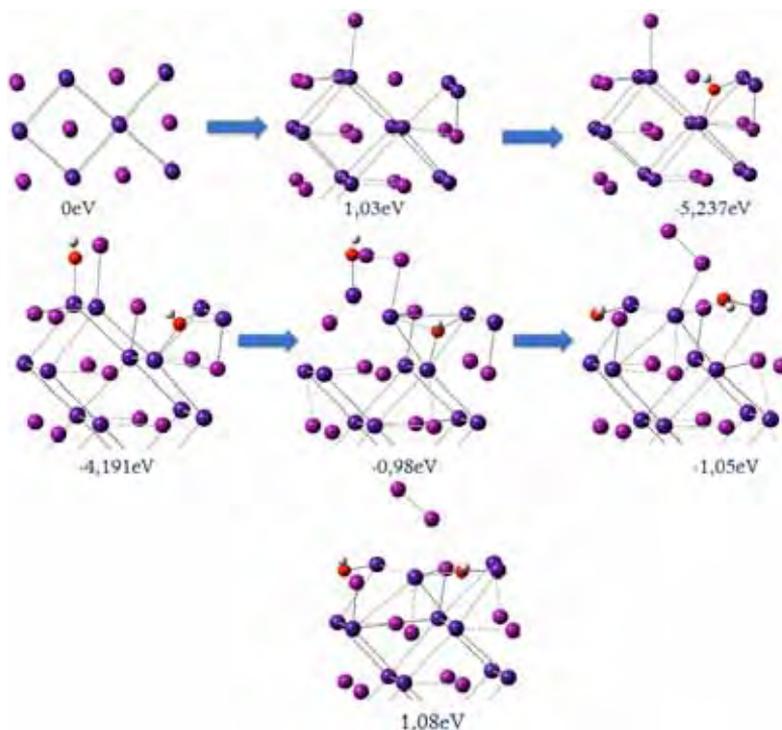


Figure 1. Formation of $I_2(g)$ in the presence of two oxidants
(Cs in blue, I in pink, O in red and H in white)

Next, it has been assumed the presence of a liquid layer on the aerosol interface because CsI particles are hygroscopic and we are wondering if the I_2 production could not result from a liquid process. In order to model a liquid phase in interaction with the CsI surface, we performed ab-initio molecular dynamics using VASP software.

We notice (Figure 2) that as soon as one iodide is transfer towards the liquid phase, Cs cation follows it such the periodic surface structure is lost.

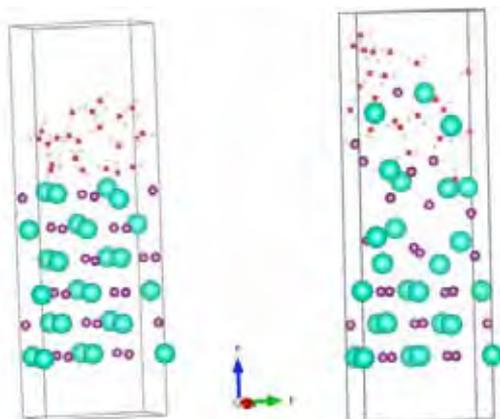


Figure 2. Layer of water on the top of CsI surface

By this pathway, the I_2 is produced in the liquid layer by the well-known radiolytic reaction between I^- and OH^\bullet . I_2 formed is next quickly transferred towards the gas phase.

The relative importance of the both reactivity pathways remains to quantify in considering some thermal corrections. Computations will be next extended to AgI aerosol.

Sujet de la thèse :

**Etude de l'adsorption des iodes radioactifs (ICH₃) par des adsorbants poreux
dans différentes conditions de fonctionnement**

Doctorant :	Charlène MOULIN
Date du début de la thèse :	01/10/2014
Laboratoire :	PSN - RES/SCA/LPMA
Financement de thèse :	Armines
Directeur de thèse :	Laurence Le Coq, Ecole des Mines de Nantes
Tuteur de thèse :	Céline Monsanglant-Louvet
Ecole doctorale :	SPIGA Nantes, Science pour l'ingénieur, Géosciences, Architecture

Depuis l'accident dit de « Fukushima Daiichi » de mars 2011, une attention accrue est apportée aux systèmes de filtration des effluents gazeux susceptibles d'être rejetés dans l'environnement. L'iode est un des radioéléments rejetés qui participe de façon prépondérante à la dose reçue par les populations. Dans ce cadre, en lien avec les conclusions des évaluations de sûreté effectuées par les exploitants, le projet ANR MiRE (Mitigation des Rejets à l'Environnement) a pour but d'évaluer l'efficacité des matériaux présents dans les moyens de rétention mis en œuvre actuellement en France et d'évaluer les potentialités des nouveaux matériaux dits innovants. Dans ce contexte, la thèse a pour objectif d'étudier de façon expérimentale et théorique le piégeage des iodes radioactifs (ICH₃) sur des adsorbants commerciaux, principalement des charbons actifs pour les matériaux poreux utilisés dans les réseaux de ventilation en fonctionnement normal, et du sable utilisé dans les systèmes des barrières ultimes des circuits de filtration des réacteurs nucléaires français.

La première partie du travail expérimental a été consacrée à l'étude physico-chimique de quatre charbons actifs commerciaux imprégnés ou non. La caractérisation montre le caractère microporeux de ces matériaux et l'influence de l'imprégnation sur la structure poreuse. En effet, une diminution de la surface spécifique du matériau est observée ainsi qu'une modification de sa composition chimique ; le pourcentage massique en azote et en iode est, par exemple, fortement augmenté.

Dans un second temps, des cinétiques d'adsorption ont été réalisées en réacteur fermé, afin d'obtenir une vitesse initiale d'adsorption et le temps d'équilibre, données absentes dans la littérature.

Pour compléter les données en réacteurs fermés, des isothermes d'adsorption seront réalisées. L'influence de la température, de l'humidité relative et du vieillissement des matériaux sera également évaluée. Puis des essais en dynamique permettront de réaliser des courbes de percée (en iode radioactif et non radioactif) à l'aide de la plateforme expérimentale PERSEE à Saclay. La comparaison des différentes études sera effectuée de façon à comprendre les mécanismes spécifiques de la rétention de l'iode radioactif et de les modéliser.

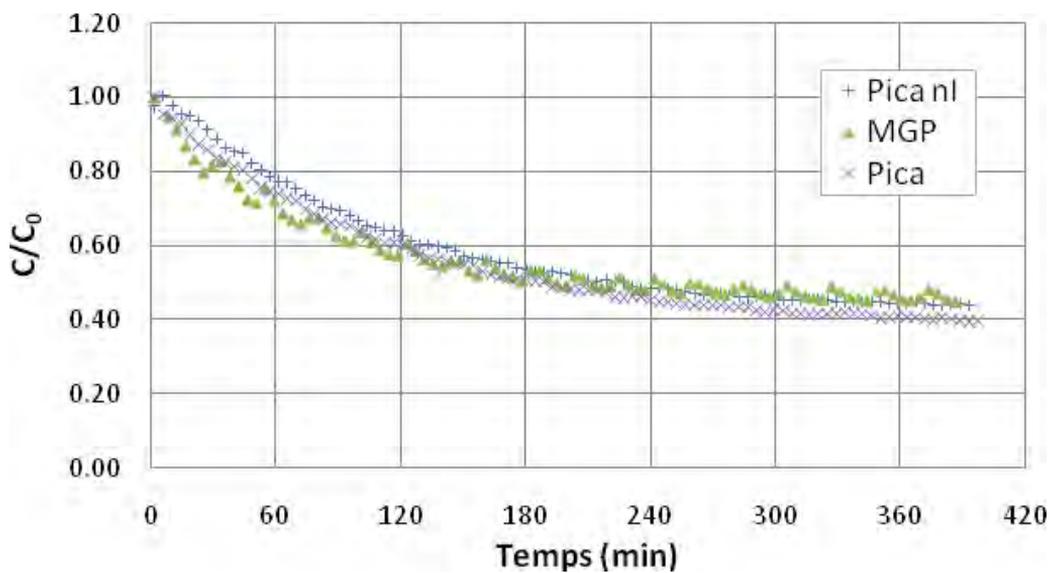


Figure 1. Cinétiques d'adsorption de l'iodure de méthyle (ICH_3) sur différents charbons actifs
 $P = 1,03 \text{ bar}$; $T = 20^\circ\text{C}$; $HR < 10 \%$

L'Ad'i(N) « association des doctorants de l'IRSN », a été créée le 13 août 2013.

L'objectif premier de l'association est de fédérer les étudiants de l'IRSN en leur offrant entraide, visibilité et convivialité.

L'objectif principal de l'association est la préparation des stagiaires, doctorants et post-doctorants à faire face à leurs avenir post-IRSN par la mise en place d'un réseau qui rassemblera différentes générations d'étudiants de l'IRSN.

Par ailleurs, l'Ad'i(N) vise à promouvoir l'IRSN ainsi que ses étudiants, sur le plan professionnel, par l'organisation de visites des différentes installations du cycle du nucléaire, et sur le plan social, en orchestrant et en participant à des événements scientifiques, sportifs et culturels.



➤ Jeudi 24 mars

09h20

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PLÉNIÈRE

Facteurs humains et organisationnels

Président : Matthieu SCHULER,
Directeur de la stratégie, du développement
et des partenariats (DSDP).

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

Sylvie THELLIER, La sécurité en radiothérapie :
coopération entre les acteurs de la prescription et de l'application.

Sujet de la thèse :**Réguler par les instruments techniques : sûreté nucléaire et risque inondation**

Doctorant :	Michaël MANGEON
Date du début de la thèse :	03/11/2014
Laboratoire :	PSN-SRDS/SFOHREX/LSHS
Financement de thèse :	ANR Agoras
Directeur de thèse :	Frédérique Pallez - Mines ParisTech (CGS)
Tuteur de thèse :	Olivier Chanton
Ecole doctorale :	Paris Ouest - « Economie, organisations, société » (EOS) - ED 396

Cette thèse en sciences de gestion vise à interroger les modes de constitution, les caractéristiques propres et les effets des instruments techniques de régulation des risques, et à mettre ainsi en lumière les liens entre ces instruments et un système de régulation des risques nucléaires⁽¹⁾. La notion de régulation nous permet d'interroger plusieurs échelles d'analyse :

- Le système de régulation des risques comme combinaison de règles, d'organisations, d'institutions, associées à un contexte politique et social.
- La régulation comme l'action collective produisant des règles⁽²⁾.

En partant de l'exemple des instruments de régulation du risque inondation, notre objectif est de répondre à trois questions :

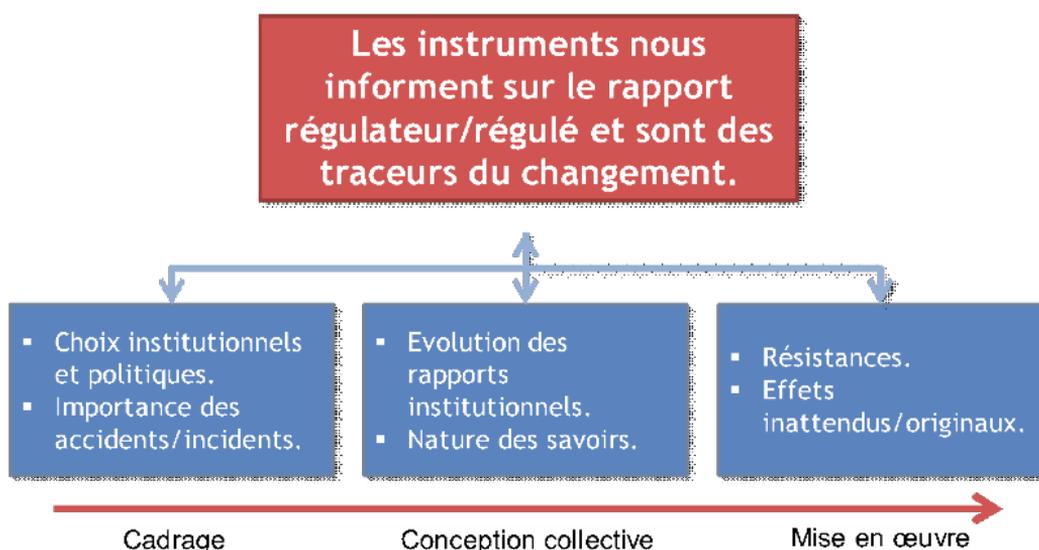
- Quels sont les critères et les modalités de choix des instruments ?
- Comment les organisations conçoivent-elles collectivement les instruments ?
- Quels sont les effets et impacts de leur mise en œuvre ?

Nous partons du postulat que l'étude de ces différentes phases, non séquentielles, nous informe sur le rapport régulateur/régulé et donc sur certaines évolutions du système de régulation.

La première année de thèse a permis de construire un historique des modalités de régulation du risque inondation et de mettre en évidence des spécificités liées aux différentes questions de recherche :

- Le choix des instruments résulte à la fois de configurations institutionnelles et d'intérêts politiques, parfois liés à des incidents/accidents, qui impactent la forme juridique et la doctrine intégrées à l'instrument.
- L'analyse des processus de conception collective des instruments apporte des informations sur l'évolution des rapports institutionnels entre grands acteurs du système et sur la nature des savoirs mobilisés, partagés, et élaborés.
- La mise en œuvre des instruments par les exploitants, peut entraîner des effets inattendus, voire des résistances éclairant les rapports de pouvoir entre les organisations. Elle suggère un fonctionnement non mécaniste de la prescription, les exploitants contribuant ainsi, par leur pratique, à l'achèvement du processus de conception de l'instrument.

Ce travail pourrait fournir à l'IRSN des éclairages sur des processus longs de constitution des instruments de régulation. Il devrait également permettre à l'IRSN de réinterroger son rôle dans les phases de cadrage, de conception et de mise en œuvre, dans la perspective des évolutions futures de ces outils.



Temporalités et instruments de régulation des risques : l'étude de trois phases non séquentielles

(1) Ce travail de thèse s'insère dans le cadre d'un programme ANR intitulé AGORAS (Amélioration de la gouvernance des organisations et des réseaux d'acteurs pour la sûreté nucléaire).

(2) Pour notre cas, il s'agit notamment de « règles générales » de bonnes pratiques, publiées par l'autorité de sûreté.

Sujet de la thèse :**L'analyse de l'activité, une étape nécessaire
pour mener une analyse des risques en radiothérapie**

Doctorant :	Sylvie THELLIER
Date du début de la thèse :	05/02/2014
Laboratoire :	PSN-SRDS/SFOHREX/BFOH
Financement de thèse :	Salariée IRSN
Directeur de thèse :	Pierre Falzon - CNAM
Tuteur de thèse :	François Jeffroy
Ecole doctorale :	CNAM - Ecole doctorale Abbé Grégoire, ED 546

L'objectif de cette thèse est de concevoir et d'expérimenter une alternative méthodologique à une démarche d'analyse des risques de type AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité), qui présente de nombreuses difficultés d'application en radiothérapie.

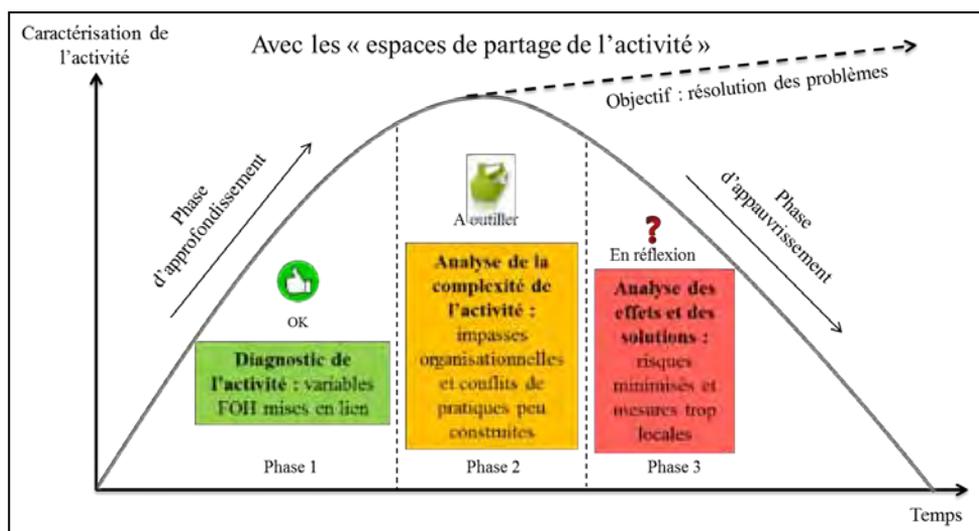
Une première étape de la thèse a consisté à étudier précisément la dynamique des interactions au sein d'un groupe de travail procédant à une analyse des risques encourus par les patients avec le support d'une grille AMDEC. L'analyse des difficultés rencontrées par ce groupe a permis de mettre en question un certain nombre de principes fondateurs de la démarche AMDEC. Pour améliorer la sécurité des radiothérapies et face aux difficultés d'identification des risques par les professionnels, nous faisons l'hypothèse qu'il n'est pas toujours suffisant de se limiter à une approche qui : a) utilise la notion de risque, b) définit les risques en termes de causes des défaillances et de probabilité d'occurrence et de gravité de leurs conséquences, c) définit des mesures de prévention.

L'alternative proposée consiste à mettre au cœur de l'analyse, non pas les risques, mais la complexité de l'activité - non pas les erreurs humaines, mais des facteurs qui peuvent favoriser leur survenue, plus particulièrement des incompréhensions entre professionnels et des difficultés non traitables (divergences sur les pratiques professionnelles, impasses organisationnelles).

Cette alternative pose trois questions :

- Est-ce qu'une clairvoyance sur la complexité du travail suffit pour améliorer la sécurité des radiothérapies ?
- Dans le cas contraire, comment peut s'opérer le dépassement de la complexité ?
- Quelles sont les conditions pour favoriser une analyse de la complexité de l'activité ?

Ainsi, dans une seconde étape, la recherche propose de réfléchir différemment sur la sécurité des soins et de définir de nouveaux principes méthodologiques. Nous proposons d'utiliser les espaces de réflexion existants (CREX, cartographie des risques) comme des espaces de discussion (Detchessahar, 2001) permettant la convocation de l'activité (Van Belleghem & al., 2015) et le débat sur le travail (Rocha, 2014). Nous faisons l'hypothèse que ces « espaces de partage de l'activité » (Thellier & al, 2015) vont aider les participants à accéder à une certaine complexité du travail en mettant en visibilité des informations relatives à des incompréhensions, des divergences sur les pratiques ou à des impasses organisationnelles.



➤ Jeudi 24 mars

10h15

Amphithéâtre Queen Mary II

SESSION PLÉNIÈRE

Accidents graves

Président : Thierry BOURGOIS,
Responsable mission, stratégie et programme.
Direction de la stratégie, du développement
et des partenariats (DSDP).

Paul-Martin STEFFEN, Investigation of the operational behaviour of a passive auto-catalytic recombiner under the extreme accident conditions inside the ITER fusion facility.

Faoulat MIRADJI, Modélisation du comportement du ruthénium lors de son transport dans le circuit primaire.

Ali SWAIDAN, Ecoulement diphasique dans un milieu à porosité évolutive.

Ange GOURBIL, Caractérisation d'un écoulement diphasique dans un milieu poreux modèle.

Sujet de la thèse :

Investigation of the operational behaviour of a passive auto-catalytic recombiner under the accident conditions inside the ITER fusion facility

Doctorant : Paul-Martin STEFFEN
Date du début de la thèse : 01/04/2014
Laboratoire : Forschungszentrum Juelich, Germany
Financement de thèse : Forschungszentrum Juelich, Germany and IRSN, France
Directeur de thèse : Hans-Josef Allelein, LRST, RWTH Aachen University, Germany
Tuteur de thèse : Dr. Ernst-Arndt Reinecke (Germany) ; Dr. Nicolas Meynet (France)
Ecole doctorale : RWTH Aachen University, Germany

Various scenarios of accident inside the ITER fusion facility may lead to the production of hydrogen and its release into the suppression tank. Then, the possibility of air ingress may result in the formation of flammable gas mixtures and explosions, which may lead to severe component failure. One optional counter-measure is the installation of passive auto-catalytic recombiners (PAR), which are currently used for hydrogen mitigation in the field of nuclear fission reactors. PARs convert hydrogen into water vapour by means of passive mechanisms and thereby help to avoid large accumulations of combustible gases. In cooperation with IRSN, Forschungszentrum Jülich and RWTH Aachen University, the operation of PARs under the specific conditions inside the suppression tank in the course of an accident is investigated.

In order to assess PAR efficiency and functionality, the existing simulation tools require enhanced models which take into account the boundary conditions inside the suppression tank. For this purpose, the experimental program includes PAR tests under low



Figure 1. REKO-4 facility

pressure, oxygen starvation, superposed flow conditions and low temperature. A scaled model of a conventional PAR is investigated inside the REKO-4 facility (Jülich), a pressure vessel with a total volume of 5.3 m³ (cf. Figure 1).

First experiments regarding low pressure (up to -800 mbar) and superposed flow conditions have been performed and allow the evaluation of the starting behaviour and the quasi steady state performance under these conditions.

For numerical analyses, the codes SPARK (IRSN) and REKO-DIREKT (Jülich), which describe the operational behaviour of PARs, will be enhanced and validated according to the experimental results. The final assessment will be performed based on the simulation of accident scenarios with the CFD code ANSYS CFX.

Sujet de la thèse :**Modélisation du comportement du ruthénium lors de son transport dans le circuit primaire**

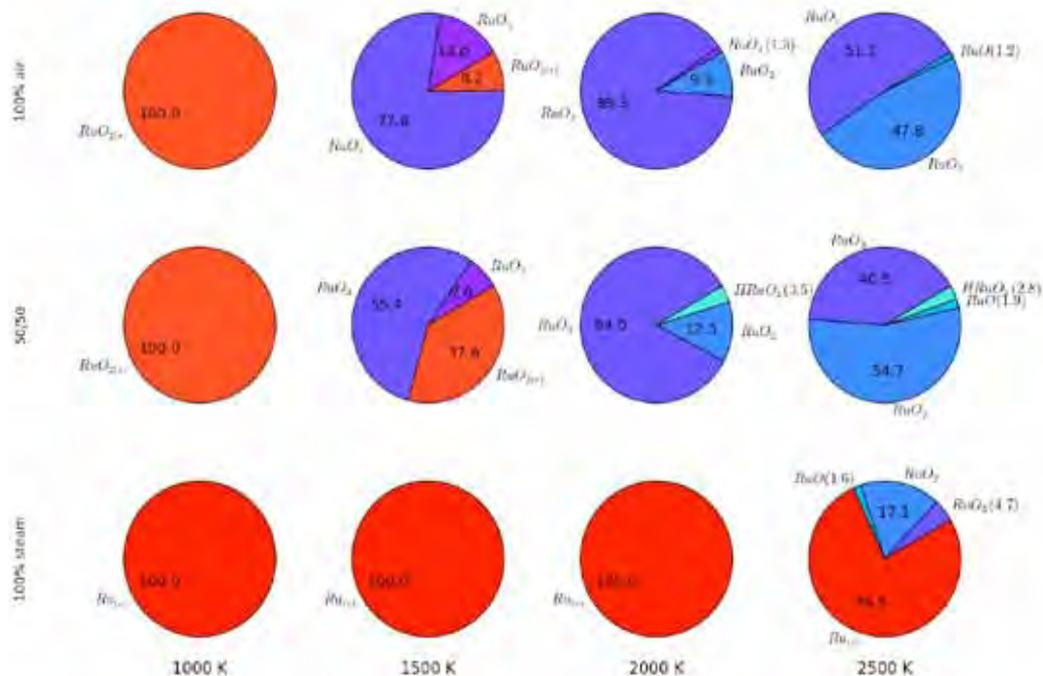
Doctorant :	Faoulat MIRADJI
Date du début de la thèse :	03/10/2013
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Florent Louis/Valérie Vallet - Université de Lille 1
Tuteur de thèse :	Laurent Cantrel/Sidi Souvi
Ecole doctorale :	Université de Lille 1/Ecole Doctorale SMRE - ED104

Lors d'un Accident Grave (AG) survenant à un réacteur nucléaire à eau pressurisée, sous atmosphère fortement oxydante, des relâchements importants de ruthénium, depuis le combustible dégradé, sont attendus du fait de la formation d'oxydes gazeux⁽¹⁾. Les composés de Ru présentent un danger d'un point de vue sanitaire lié aux isotopes ¹⁰³Ru et ¹⁰⁶Ru, radio-contaminants de demi-vie respectives de 39 et 365 jours. En outre l'oxyde RuO₄, fortement volatil, est susceptible d'être relâché à l'environnement^(2,3). L'évaluation de ce terme source, avec le code de simulation des accidents graves ASTEC, présente aujourd'hui des incertitudes importantes, liées entre autres aux données thermochimiques des composés de ruthénium gazeux avec des disparités entre les valeurs de la littérature pour les oxydes. Concernant les oxyhydroxydes, les données sont très rares et celles disponibles sont sujettes à caution.

Un premier volet a consisté à déterminer une méthodologie de travail pour obtenir les données thermochimiques des oxydes ruthénium gazeux en fonction de la température, via des outils de chimie quantique, avec des niveaux de théorie hautement corrélés⁽⁴⁾. Cette stratégie fut ensuite appliquée à 21 espèces d'oxyhydroxydes susceptibles d'exister dans nos conditions d'étude⁽⁵⁾. A la lumière de ces nouvelles données thermodynamiques, des calculs de spéciation chimique ont été effectués afin de prédire les espèces gazeuses les plus stables mises en jeu lors du transport du ruthénium dans le circuit primaire sous atmosphère oxydante⁽⁵⁾.

A l'aide des propriétés thermochimiques des espèces d'intérêts et des méthodologies développées, un deuxième volet sera présenté sur la recherche des constantes cinétiques relatives aux chemins réactionnels liés au transport des oxydes de ruthénium, notamment RuO₄ espèce dominant le transport à basses températures selon les essais START réalisés dans le cadre du projet OCDE STEM/START⁽⁵⁾. Les données cinétiques obtenues seront intégrées au code ASTEC, conduisant à l'interprétation des essais expérimentaux START afin de valider ces modèles. L'objet final est de disposer d'une modélisation qualifiée permettant de prédire le terme source en ruthénium pour des conditions A.G.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du laboratoire commun C3R et est inclut dans le LABEX CaPPa.



Spéciation du ruthénium ($HRuO_4$ and $HRuO_3$ correspondent respectivement aux espèces gazeuses $RuO_3(OH)$ et $RuO_2(OH)$) pour un inventaire de 0.1 mol de Ru pour des mélanges air-vapeur de 0,50 et 100%, sous une pression de 2 bar dans un volume de $1m^3$ à différentes températures. Les espèces dont les concentrations sont inférieures à 1% ne sont pas représentées, extrait de (4)

- (1) Y. Pontillon, G. Ducros, Behaviour of fission products under severe PWR accident conditions. The VERCORS experimental programme|Part 3: Release of low-volatile fission products and actinides. Nucl. Eng. Des. 2010, 240, 1867-1881.
- (2) C. Mun, L. Cantrel, C. Madic Review of Literature on Ruthenium Behavior in Nuclear Power Plant Severe Accidents. Nucl. Technol. 2006, 156, 332-346.
- (3) F. Miradji, C. Cousin, S. Souvi, V. Vallet, J. Denis, V. Tanchoux, L. Cantrel, Modelling of Ru behaviour in oxidative accident conditions and first source term assessments, ERMSAR (European Review Meeting on Severe Accident Research) conference, Marseille (France), March 24-26, 2015.
- (4) Thermodynamic Properties of Gaseous Ruthenium Species, F. Miradji, S. Souvi, L. Cantrel, F. Louis, and V. Vallet J. Phys. Chem. A 2015 119 [20], 4961-4971
- (5) Thermochemistry of Ruthenium Oxyhydroxide Species and Their Impact on Volatile Speciations in Severe Nuclear Accident Conditions. F. Miradji, F. Viro, S. Souvi, L. Cantrel, F. Louis, and V. Vallet, J. Phys. Chem. A 2016, 120, 606-614.

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
Financement de thèse :	EDF
Directeur de thèse :	Michel QUINTARD - IMFT Toulouse
Tuteur de thèse :	Florian FICHOT
Ecole doctorale :	Toulouse - Sciences de l'univers de l'environnement et de l'espace SDU2E - ED 173

Severe accidents arising from the fusion of the nuclear reactor core must be anticipated to enhance the efficiency of its mitigation. Such accidents have occurred at TMI-2 in the USA-1979, Chernobyl-1984 and in Fukushima, Japan-2011 where 3 reactors were destroyed.

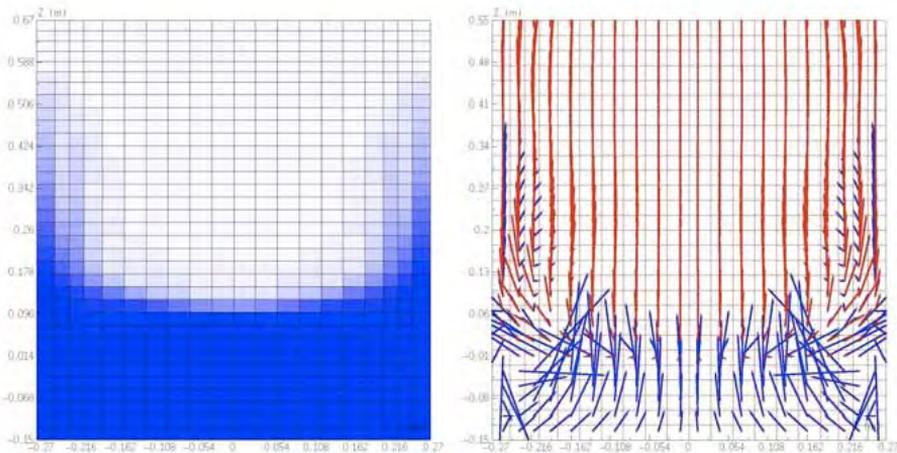
Following a loss of coolant accident, the reactor core gets uncovered and starts to accumulate residual heat. As the accident evolves, core heating and oxidation of the fuel cladding by the coolant vapor provoke core degradation. In this case, injection of water into the core (reflooding) to remove the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

Reflooding can cause a thermal shock and the embrittlement of the cladding, hence forming a porous debris bed in the core. The arrival of steam that is generated by cooling the lower zones may activate the oxidation of Zircaloy at high temperature zones, the reaction is very exothermic and leads to partial melting of materials. Those molten materials tend to move within the porous medium and thus reducing the porosity in the accumulation zones and increasing it in the zones from which they migrate. Due to this heterogeneity and the varying degrees of degradation, the coolant flow becomes multi-dimensional. This is a multiphase system including 4 phases: gas, liquid (water), liquid (molten material) and solid particles constituting the porous debris bed.

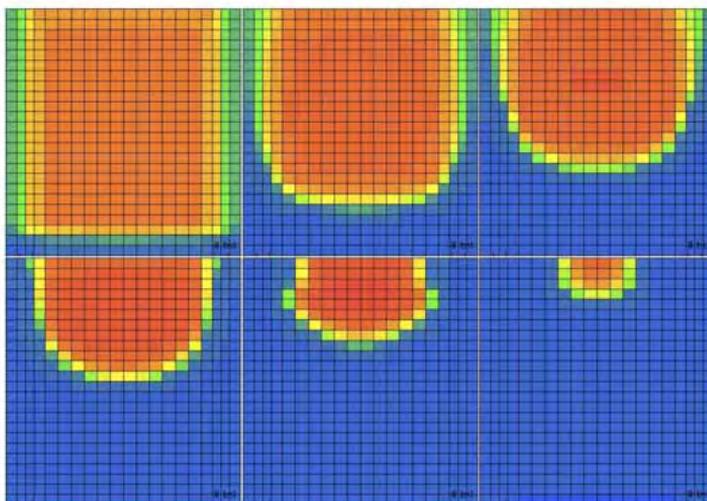
PEARL experiments are modeled and simulated using ICARE/CATHARE code (developed by IRSN for core degradation studies) to assess the evolution of a bottom reflooding of a hot debris bed surrounded by a bypass of larger porosity to simulate the presence of intact zones in the core around the compact debris bed. The tests were done at different initial temperatures, pressures, and water injection velocities followed by sensitivity analysis to assess the effect of each on the process of cooling of a hot debris bed and the behavior of entrainment of injected water into the less damaged bypass zone.

Conservation equations of mass, energy, and chemical species are to be further developed into a volume averaged form considering several assumptions to account for the oxidation reaction (Zircaloy oxidation).

This should integrate with the initiatives of improving the previously developed model in order to deal with highly exothermic reaction causing local geometrical modifications consequent to partial melting of the porous medium, and include a refined structure of the medium as the two-phase flow is very sensitive to evolution of this structure. The models developed in this thesis will be used by IRSN to improve the ASTEC code (IRSN's reference code for simulating core meltdown accidents).



PEARL PA5 test, Void fraction 2D field (left), Liquid & Gas velocity vector fields(right) scale $V_g/V_l=700$
 $P = 1\text{bar}$, $T_i = 400^\circ\text{C}$, $V_{inj} = 10\text{ m/hr}$



PEARL test PA2, evolution of Temperature 2D field, $P=1\text{bar}$, $T_i=700^\circ\text{C}$, $V_{inj}=5\text{m/hr}$

Simulations of bottom reflooding of a hot debris bed surrounded by a bypass

Sujet de la thèse :**Caractérisation d'un écoulement diphasique dans un milieu poreux modèle**

Doctorant :	Ange GOURBIL
Date du début de la thèse :	09/12/2013
Laboratoire :	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC et IMFT Toulouse
Financement de thèse :	cofinancement EDF
Directeur de thèse :	Marc PRAT, IMFT
Tuteur de thèse :	Florian FICHOT
Ecole doctorale :	Ecole doctorale MEGeP, Institut National Polytechnique de Toulouse

Contexte

Lors d'un accident grave de perte de réfrigérant primaire, la dégradation des matériaux d'un cœur de réacteur nucléaire peut conduire à la formation d'un lit de débris radioactifs que l'on cherche à refroidir en y injectant de l'eau, dans une opération appelée renoyage. La compréhension des phénomènes en jeu nécessite de s'intéresser à l'ébullition intense dans un milieu poreux surchauffé. Cette thèse s'inscrit dans un programme expérimental de l'IRSN axé autour des dispositifs PRELUDE, PEARL, et CALIDE, visant à valider et à affiner les modèles implantés dans les codes de simulation du renoyage actuellement utilisés à l'IRSN.

Objectifs

Le travail présenté ici est orienté sur la caractérisation expérimentale des phénomènes d'ébullition à l'échelle du pore. Il reprend un dispositif réalisé au cours d'une thèse précédente par Paul Sapin à l'IMFT. Ce dispositif est constitué d'un milieu poreux modèle bidimensionnel chauffé en masse, qui permet de visualiser les écoulements à l'échelle du pore (Figure 1.a) et d'effectuer des mesures thermiques locales. Un objectif important est d'estimer le taux de vide (fraction volumique de gaz) en exploitant les visualisations obtenues. Une nouvelle cellule d'essai offrant un meilleur contrôle des éléments chauffants a été réalisée. Il s'agit notamment d'effectuer de nouvelles mesures thermiques afin d'étudier l'influence du taux de vide sur le flux critique. Par ailleurs, un dispositif bidimensionnel d'expérience diphasique isotherme a été conçu et réalisé. La cellule d'essai a une géométrie semblable à celle de l'expérience d'ébullition, mais l'écoulement diphasique est isotherme, avec injection du gaz localement dans le liquide (Figure 1.b). On cherche ainsi à reproduire à froid les mêmes structures d'écoulements que celles obtenues à chaud, dans des conditions où le débit de gaz est parfaitement contrôlé. Cela permet de vérifier de façon plus fiable les mesures de taux de vide et de les relier à des mesures de vitesse moyenne.

Principaux résultats et perspectives

La nouvelle cellule d'essai pour les expériences d'ébullition convective est en fin d'assemblage.

Des algorithmes ont été développés sous Matlab pour segmenter les images des écoulements diphasiques, qui sont particulièrement complexes à traiter. Ils permettent d'évaluer un ordre de grandeur du taux de vide moyen. Les visualisations effectuées sur l'expérience diphasique froide, où le débit de gaz injecté est mesuré, servent de référence pour calibrer ces algorithmes de traitement d'images.

L'expérience d'écoulement diphasique isotherme permettra aussi d'effectuer une étude des pertes de charge diphasiques dans un milieu poreux modèle très perméable.

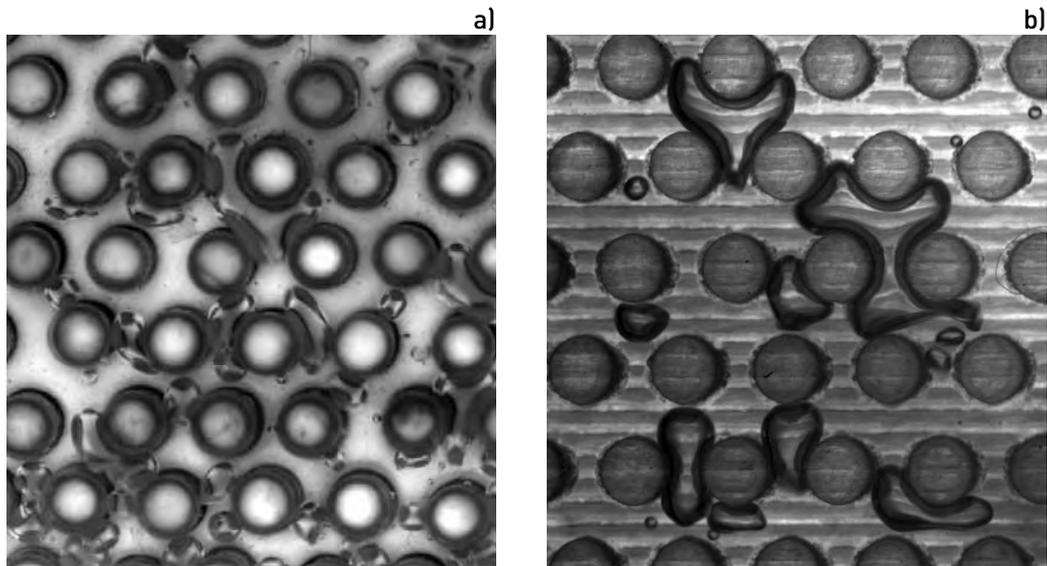


Figure 1: a) Visualisation d'ébullition convective; b) Visualisation d'écoulement diphasique isotherme

Présentations posters

Pôle radioprotection :

➤ Sessions le mardi (14 h 30) et mercredi (14 h 20)

Dosimétrie - Epidémiologie - Radiobiologie - Sismologie -
Risques environnementaux - Transferts dans la géosphère.

Résumés pages 130 à 158.

Pôle sûreté :

➤ Sessions le mardi (14 h 30) et mercredi (14 h 20)

Combustible - Matériaux - Incendie - Méthodes -
Aérosols et filtration - Facteurs humains et organisationnels.

Résumés pages 159 à 186.

Sujet de la thèse :**Evaluation des modes d'action toxique du tritium sous sa forme libre (HTO)
sur les stades de développement précoces du poisson zèbre (*Danio rerio*)**

Doctorant :	Caroline ARCANJO
Date du début de la thèse :	01/10/2015
Laboratoire :	PRP - ENV/SERIS/LECO
Financement de thèse :	IRSN/EDF
Directeur de thèse :	Christelle Adam-Guillermin - IRSN
Tuteur de thèse :	Béatrice Gagnaire - IRSN
Ecole doctorale :	Sciences de l'Environnement - AMU - ED 251

Le tritium (^3H) est un isotope radioactif de l'hydrogène, ce qui le rend très mobile dans les écosystèmes. Dans l'environnement, il peut se retrouver sous plusieurs formes, notamment sous forme d'eau (HTO) ou lié à la matière organique (OBT). En France, le tritium est principalement rejeté par les installations nucléaires de production d'électricité en fonctionnement normal et la future mise en place de la fusion thermonucléaire contrôlée augmentera son rejet. Il est donc primordial d'évaluer son impact sur les écosystèmes, notamment aquatiques qui sont des milieux récepteur des effluents liquides des centrales.

Cette thèse a pour objectif d'évaluer les modes d'action toxique du tritium sous sa forme HTO sur les stades de développement précoce du poisson zèbre. Ce petit poisson tropical est un organisme modèle fréquemment utilisé et recommandé pour les tests d'écotoxicité. Nous avons choisi de travailler sur les stades précoces (œufs et larves) car ils sont caractérisés comme étant les plus sensibles.

Le premier axe du travail de thèse sera de caractériser la bioaccumulation du tritium dans les organismes pour en déterminer la part biologiquement active. Cette étape est indispensable pour la caractérisation de la relation dose-réponse, mais délicate pour l'HTO dont les cinétiques d'échange sont rapides. Une première manipulation évaluera la bioaccumulation du tritium sous formes HTO et OBT après une exposition à $1,22 \cdot 10^5$ Bq/mL d'HTO.

Le second axe se focalisera sur les effets du tritium. L'ADN étant une des cibles biologiques des rayonnements ionisants, l'impact de l'exposition à HTO sera évalué sur le patron d'expression des gènes via une analyse transcriptomique et sur des biomarqueurs de dommages à l'ADN: test des comètes et nombre de foci γH2AX (collaboration PRP-HOM/SRBE/LDB). Les résultats de l'analyse transcriptomique détermineront les fonctions biologiques les plus impactées par le tritium et permettront de mesurer d'autres biomarqueurs d'intérêt pour évaluer ses effets. Le tritium impacte également de façon négative le développement des organismes. Les paramètres développementaux à l'échelle macro- (éclosion, malformations) et microscopique (MET) seront également évalués dans cet axe.

L'ensemble de ces résultats sera acquis à différentes doses de tritium afin de pouvoir calculer son efficacité biologique (RBE) et d'évaluer des effets dose-réponse.

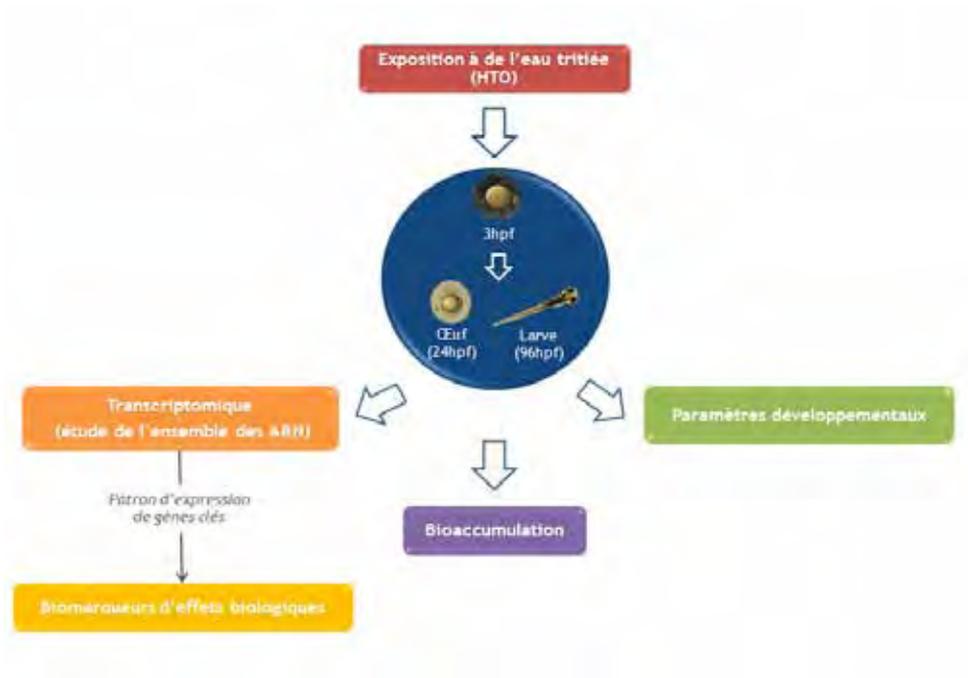


Schéma général des expérimentations prévues pendant la thèse

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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Didier FRANCK - IRSN
Tuteur de thèse :	David BROGGIO
Ecole doctorale :	Université Paris-Saclay/PHENIICS

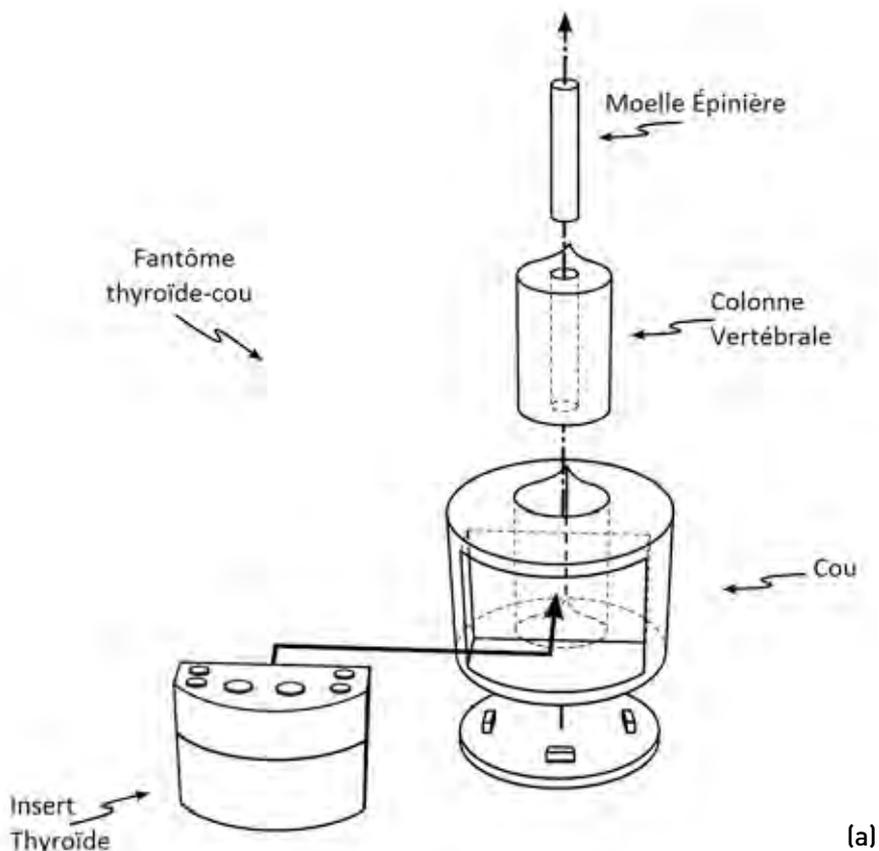
L'anthroporadiamétrie est une méthode de surveillance qui consiste à estimer l'incorporation des radionucléides à partir de mesures spectrométriques. Dans la pratique, l'étalonnage est réalisé à l'aide de fantômes physiques qui restent à ce jour limités vis-à-vis de l'anatomie humaine. De nombreuses recherches ont porté sur le développement d'étalonnages réalistes à l'aide de fantômes numériques et de simulations Monte Carlo. Grâce au développement de l'impression 3D, il est aujourd'hui possible de revenir à des techniques plus adaptées à la mesure. En cas d'accident nucléaire, tous les isotopes de l'iode sont rejetés dans l'atmosphère et ont la particularité de se fixer naturellement dans la thyroïde. La population exposée risque de développer un cancer de la thyroïde et ce risque est maximal chez les enfants, étant donné leur plus grande radiosensibilité. Plusieurs incidents ont montré la difficulté d'interprétation des mesures thyroïdiennes chez l'enfant. En effet, on utilise un fantôme d'étalonnage adulte car il n'existe pas à ce jour de fantôme thyroïdien enfant.

Afin d'obtenir une meilleure estimation du risque sanitaire chez les enfants, des fantômes thyroïdiens anthropomorphes ont été conçus pour différentes classes d'âge (5, 10, 15 ans, et l'homme adulte).

À l'aide d'un logiciel d'infographie, des modèles de thyroïdes adaptés à l'âge ont été réalisés. Ces modèles sont insérés dans des cous, incluant une vertèbre, une moelle épinière et une trachée. Tous ces éléments sont adaptés pour chaque âge. Une part importante du travail a consisté à optimiser la fabrication de l'insert afin de reproduire une atténuation réaliste, de garantir son étanchéité et sa robustesse dans le temps.

Les efficacités de comptage, au contact du détecteur, ont montré 25% d'écart entre l'enfant de 5 ans et l'adulte. La comparaison des efficacités de comptage entre le fantôme de référence de l'IRSN et le fantôme adulte développé est de l'ordre de 7%. Les fantômes ont ainsi pu être validés et brevetés (FR1650855).

Par la suite, une étude systématique sera menée afin de définir le protocole le plus approprié pour la mesure de l'enfant en situation post-accidentelle. Ces fantômes serviront également en médecine nucléaire pour améliorer la dosimétrie et la quantification de l'activité injectée.



(a)



(b)

(a) Schéma reprenant les différents éléments composants le fantôme thyroïde-cou

(b) Photographie des quatre fantômes thyroïde-cou

Sujet de la thèse :

Analyses des risques de pathologies cancéreuses et de l'appareil circulatoire au sein d'une cohorte de travailleurs surveillés pour contamination interne à l'uranium

Doctorant :	Ségolène BOUET-RIVOAL
Date du début de la thèse :	05/10/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LEPID
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Dominique Laurier - IRSN
Tuteur de thèse :	Olivier Laurent - IRSN
Ecole doctorale :	Université Paris Sud / EDSP

A ce jour, 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 radiations ionisantes sont établis et de mieux en mieux caractérisés, l'hypothèse d'un effet de faibles doses de rayonnements ionisants 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, en support à la consolidation des normes internationales de radioprotection. 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, surveillés pour contamination interne à l'uranium.

La thèse s'articule autour de trois axes :

- L'analyse statistique de la mortalité dans une cohorte de 1300 travailleurs d'usines de traitement du minerai d'uranium (*millers*), qui sera comparée avec la mortalité de la population générale française par calcul de rapports de mortalité standardisés.
- L'analyse statistique de l'association entre dose interne et mortalité au sein d'une cohorte française de 4000 travailleurs de l'uranium, pour plusieurs causes de décès (cancers et maladies de l'appareil circulatoire), en prenant en compte l'impact de facteurs de confusion potentiels (ex: âge, sexe, période calendaire, dose externe, niveau socio-économique, tabagisme, indice de masse corporelle, tension artérielle, diabète).
- Et enfin l'analyse statistique au sein de cette même cohorte de la relation entre dose interne résultant de l'exposition à l'uranium et variations de la tension artérielle (données longitudinales répétées sur plusieurs années) en prenant en compte les cinétiques respectives de ces variables.

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
Financement de thèse :	IRSN/Région PACA
Directeur de thèse :	Fabien Anselmet - CNRS
Tuteur de thèse :	Patrick Boyer
Ecole doctorale :	AMU/Sciences de l'Environnement - ED 251

Les radionucléides présents dans les effluents radioactifs émis dans les rivières par l'industrie nucléaire sont transportés sous des formes dissoutes et des formes particulières fixées aux particules en suspension et aux sédiments de fond. Au premier ordre, les fractions particulières dépendent de la taille des particules ; plus elles sont fines, plus leur surface spécifique est importante et plus l'adsorption des radionucléides en est favorisée. La connaissance de la granulométrie des matières en suspension est donc un élément essentiel de la détermination des flux et des transferts des radionucléides dans les cours d'eau. À ce jour, l'information sur la charge en suspension est essentiellement obtenue de manière empirique par des lois de type charge-débit qui ne fournissent pas d'indications sur la granulométrie de la suspension.

Dans ce contexte, le but de cette thèse est de développer une approche pour évaluer la granulométrie de la charge en suspension en fonction des propriétés morphologiques et hydrodynamiques des cours d'eau. En particulier, il sera testé une méthode basée sur le ratio entre la densité énergétique de l'écoulement et l'énergie nécessaire au maintien d'une suspension à une granulométrie et une concentration donnée. Pour cela, des expériences préliminaires sur des matériaux calibrés mis en suspension dans une cuve à agitation contrôlée ont été réalisées en 2015 au cours d'un stage de Master II et seront approfondies en 2016.

Ces premiers mois de thèse seront consacrés à l'optimisation du dispositif et du protocole, en particulier pour mieux contrôler et caractériser les propriétés énergétiques de l'écoulement. Les adaptations du dispositif sont en cours de réalisation et la campagne expérimentale se déroulera pendant le premier semestre 2016.

Dans une deuxième phase, les concepts théoriques issus de ces expérimentations seront confrontés à des données *in situ* telles que les données charge-granulométrie-débit acquises par la station SORA de l'IRSN basée à Arles sur le Rhône aval. *In fine*, ces différents développements ont vocation à être intégrés au code de calcul CASTEAUR (CALcul Simplifié des Transferts dans les cours d'EAUx Récepteurs) de l'IRSN dédié à l'évaluation opérationnelle des transferts de radionucléides dans les cours d'eaux.

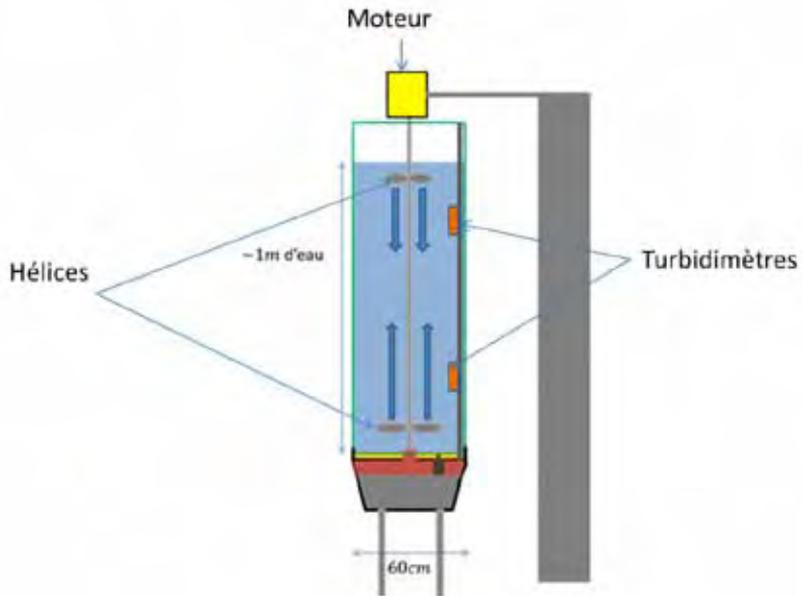


Figure 1. Expérience utilisée durant la thèse de Thomas Ferracci

Sujet de la thèse :

Etude 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

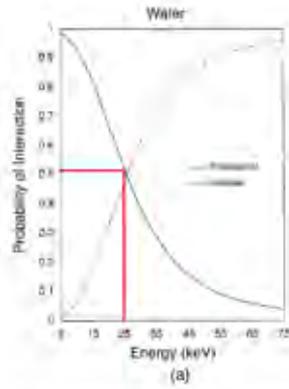
Doctorant :	Amélie FRÉNEAU
Date du début de la thèse :	07/09/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LDB
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Laurence Roy - IRSN
Tuteur de thèse :	Gaëtan Gruel
Ecole doctorale :	Université Paris Saclay

Structure et Dynamique des Structures du Vivant

Lors d'un examen radiologique, la dose délivrée aux organes du patient varie de quelques dixièmes à quelques dizaines de mGy. Ces faibles doses s'accumulent tout au long de la vie d'un individu, certains patients pouvant être soumis à plusieurs dizaines d'examen au cours d'une même année. Les risques liés à de telles expositions restent à identifier, à comprendre et à évaluer. Dans le cadre de la radiologie interventionnelle ou d'un examen de type mammographie, un rayonnement X de basse énergie est utilisé (<100keV). 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. En dessous d'une énergie de 30 keV, on observe une diminution de la probabilité d'interaction par effet Compton et une augmentation des interactions de type photoélectrique. Ce changement entraîne une modification du spectre énergétique des électrons secondaires, et donc potentiellement une modification de la répartition et de la qualité des dommages radio-induits résultants.

Pour étudier cette différence, des cellules endothéliales humaines ont été irradiées à 4 doses de rayons X (0,25, 0,5, 1 et 2 Gy) à des tensions de 40kV et de 220kV. Les foci γ -H2AX, signalisation précoce des dommages de l'ADN, ont été étudiés 30 minutes après l'irradiation à l'aide d'une plateforme de microscopie à fluorescence.

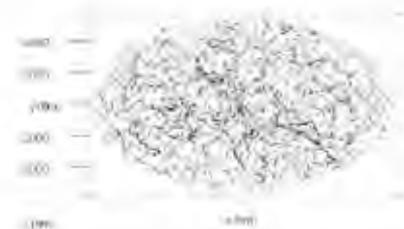
Pour une même dose, la variabilité intercellulaire du nombre de foci γ -H2AX par noyau est plus importante à une tension de 40 kV qu'à 220 kV. Une cinétique de temps post-irradiation sera mise en place pour confirmer si cette tendance persiste et pour comparer la qualité des dommages de l'ADN, notamment à travers leur capacité à perdurer dans les cellules.



Différences de distribution spatiale des ionisations dans un noyau cellulaire (simulation). Pour une dose donnée de 0,5 Gy :



Photons de basse énergie : Effet



Photons de haute énergie : Effet

↓

Est-ce que cette différence d'interaction avec la matière pourrait générer différents types de dommages signalisés ?
Et donc les différences biologiques observées ?

Sujet de la thèse :**Etude multigénérationnelle chez le rat après exposition chronique à l'uranium**

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

Ce projet s'inscrit dans la cadre de l'étude des effets sanitaires pouvant être liés aux expositions chroniques à faibles doses, d'éléments chimio et/ou radiotoxiques pour lesquels le manque de connaissance scientifique ne permet pas de statuer en terme de risque. Parmi les nombreuses sources d'exposition humaine, l'uranium est un élément radiochimique susceptible de contaminer les cours d'eau et/ou la chaîne alimentaire lors de rejets anthropogéniques accidentels. Chez le rat contaminé de façon chronique à faible dose d'uranium, des effets biologiques significatifs ont été mesurés dans différents systèmes physiologiques tant au niveau génique que protéique et métabolique (vitamine D, acétylcholine, fer, n1-méthyl-nicotinamide...) sans pathologie observable. Fort de ce constat, la question du risque d'effets transmissibles à la descendance se pose. Ceci nécessitera premièrement, d'identifier sur plusieurs générations de rats, l'ensemble des systèmes métaboliques susceptibles d'être impactés. À ce titre, l'analyse métabolomique des biofluides d'animaux contaminés a récemment permis d'identifier certaines cibles biologiques qui pourraient être des indicateurs précoces de déséquilibres physiologiques voire des prédicteurs de risques.

Ce projet de thèse s'intéressera au suivi d'une cohorte de rats dans le cadre d'une exposition multigénérationnelle à faible dose d'uranium (fig. 1). Au regard des résultats d'études précédentes, la première partie du projet recherchera dans le tissu rénal (organe cible des effets toxiques de l'uranium) d'une population de rats contaminés à faible et très faible dose (de 40 à 0.015 mg d'uranium/L d'eau de boisson), une possible modification du métabolome. En s'appuyant sur l'identification des principaux marqueurs d'exposition qui justifieraient cet effet, il s'agira ensuite de rechercher et comprendre l'origine biologique de ce déséquilibre métabolique par la mise en œuvre de techniques analytiques complémentaires et ciblées (mesure d'expression des gènes, des protéines, activités enzymatiques...). Dans une seconde partie, un suivi métabolomique sanguin, urinaire, rénal et testiculaire des deux générations suivantes de rats sera réalisé. Pour compléter nos études, nous nous intéresserons à la problématique des perturbateurs métaboliques et/ou endocriniens. Une attention particulière sera portée sur l'étude des voies métaboliques et de signalisation des stéroïdes à l'échelle somatique et gonadique.

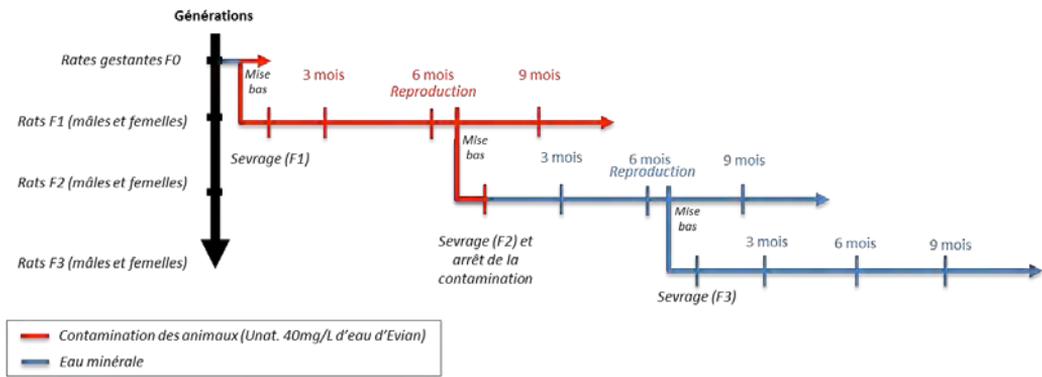


Figure 1. Protocole expérimental d'une exposition multigénérationnelle

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

Doctorant :	Eric LASCAR
Date du début de la thèse :	01/10/2015
Laboratoire :	Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LHyGeS) et PRP - ENV/SESURE/LEREN
Financement de thèse :	IRSN/ANDRA
Directeur de thèse :	François CHABAUX/Sophie RIHS - LHyGeS
Tuteur de thèse :	Laurent POURCELOT
Ecole doctorale :	Université de Strasbourg/ED 413 Sciences de la Terre

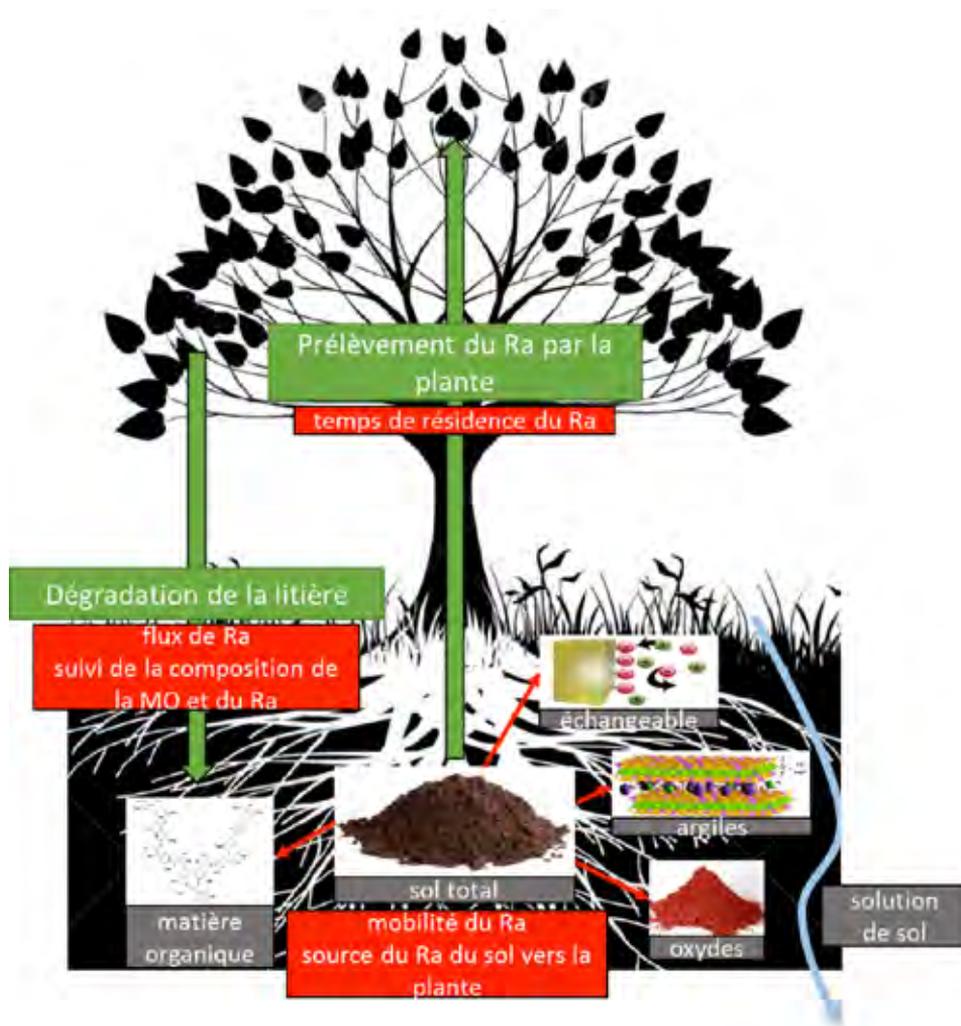
Cette thèse s'inscrit dans la thématique de la prévision du transfert des pollutions radioactives dans l'environnement en s'intéressant au cas du radium (Ra), résidu de l'extraction du minerai d'uranium, mais aussi déchet de l'industrie pétrolière.

Cette étude cherche à caractériser le comportement de Ra dans les sols et les végétaux, en identifiant les composants du sol contrôlant sa mobilité. Elle vise également à déterminer les mécanismes et la cinétique de transfert de Ra vers les plantes, ainsi que son recyclage vers le sol après son dépôt dans la litière, grâce à la mesure du rapport $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$. Ce traceur isotopique permettra d'une part de déterminer les sources de Ra transitant dans les écosystèmes, mais également de déterminer les temps de résidence du Ra dans la végétation, le ^{228}Ra possédant une courte période (5,7 ans).

Ce projet s'appuie sur trois sites de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) de l'Andra, deux sous forêt et un sous prairie, afin d'étudier l'influence de la lithologie et du type de couvert végétal sur le comportement de Ra, au travers d'analyses géochimiques et isotopiques des différents constituants du sol (fraction « échangeable », oxydes métalliques, argiles, matières organiques (MO)).

Une étude est également mise en place visant à suivre la dégradation de la litière sur deux ans, en étudiant conjointement l'évolution de l'activité de Ra et les caractéristiques de la MO visant à donner une estimation quantitative du flux de Ra induit par la dégradation de la litière, mais également à comprendre les mécanismes de fixation de Ra sur la MO.

Dans un premier temps, les travaux se concentrent sur un site relativement pauvre en argile et situé sous forêt. Le suivi de la dégradation de la litière est opéré par des sacs à litière placés *in situ*, récupérés mensuellement pour analyses (MO et Ra). Les solutions de sol sont prélevées mensuellement afin d'étudier les flux et les sources de Ra exporté hors du sol. Un profil de sol a été échantillonné et un protocole d'extraction des différents composés organiques (échangeable, lipides et macromolécules) permettant l'analyse conjointe des composés organiques et de Ra est en cours de développement.



Cycle biogéochimique de Ra à l'interface eau/sol/plante. Les principaux flux de Ra à l'interface sol/plante (en vert) et les thématiques abordées durant la thèse (en rouge)

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

Doctorant :	Dalila LEBSIR
Date du début de la thèse :	05/10/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LRTOX
Financement de thèse :	ANR/RSNR - PRIODAC
Directeur de thèse :	Maâmar SOUIDI
Tuteurs de thèse :	Maâmar SOUIDI ; Anick PECH (DAPSA/PCA)
Ecole doctorale :	Paris-Sud 11/ED569, Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué

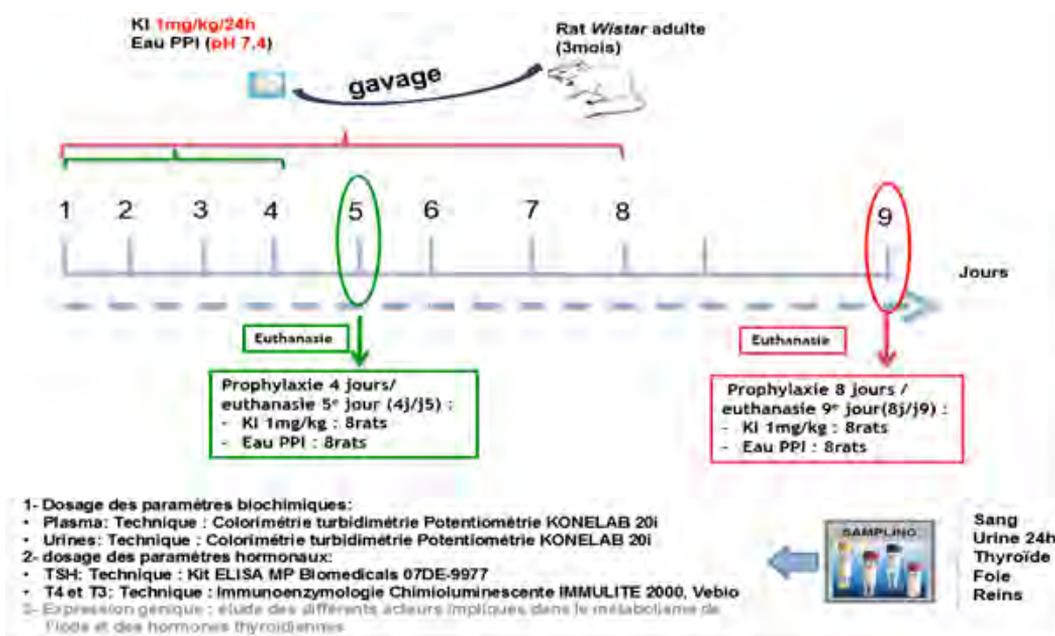
À la suite d'un accident nucléaire, les rejets radioactifs dont l'iode 131 peuvent être responsables, en l'absence de mesures de protection adaptées, de l'apparition de cancers de la thyroïde, en particulier chez les nourrissons et les jeunes enfants. Les conséquences sanitaires peuvent néanmoins être limitées par la mise en œuvre de mesures de protection, telles l'ingestion de comprimés d'iodure de potassium (KI). Cette mesure a pour objectif 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 iode extraite de la notice de la spécialité pharmaceutique « *Le traitement consiste en une prise unique, il ne doit être renouvelé que dans des cas exceptionnels uniquement sur instruction des autorités compétentes* » ne peut protéger de manière satisfaisante les populations exposées à des rejets répétés d'iodes radioactifs. Ainsi, les autorités sanitaires se trouvent démunies face à des situations de rejets chroniques d'iodes radioactifs en raison de l'absence d'un schéma thérapeutique validé pour toutes les tranches d'âge, et du déficit de connaissances toxicologiques quant aux modalités d'administrations répétées 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* (ANR/RSNR). Ce projet propose de déterminer les modalités d'administrations répétées du KI en situation de rejets radioactifs chroniques, d'évaluer les effets indésirables après administrations répétées sur les grandes fonctions physiologiques de l'organisme et de mieux comprendre les mécanismes moléculaires de la régulation du métabolisme de l'iode. Les résultats des travaux de ce projet permettront à termes de proposer aux autorités sanitaires de nouvelles solutions opérationnelles pour la prévention des expositions aux iodes radioactifs.

Récemment, des études de pharmacocinétique effectuées à l'IRSN, ont déterminé les modalités optimales d'administrations répétées du KI (1mg/Kg/24h sur une durée de 8 jours). Ainsi, l'objectif de ce travail de début de thèse est d'utiliser ce schéma de prophylaxie pour étudier l'impact biologique sur les hormones associées à la fonction thyroïdienne. Dans le protocole expérimental nous avons utilisé 4 groupes de rats adulte (8/groupe) ; une prophylaxie toutes les 24h sur une durée de 4 jours ou 8 jours avec du KI à 1mg/kg ou de l'eau sans KI pour les témoins. Le 5^{ème} et le 9^{ème} jour les

rats ont été euthanasiés, le sang et l'urine ont été prélevés afin d'effectuer une analyse hormonale et biochimique. La thyroïde, le foie et les reins ont également été prélevés pour évaluer les effets géniques des acteurs impliqués dans le métabolisme de l'iode et des hormones thyroïdiennes.

Les résultats de cette étude montrent une absence de modification du taux circulant de TSH, T4L, T3L et du ratio T3/T4, ainsi qu'une absence de modifications des paramètres biochimiques plasmatique et urinaire des grandes fonctions physiologiques telles que les transaminases pour la fonction hépatique, la créatinine et l'urée pour la fonction rénale, la CK et la CK-MB pour la fonction cardiaque.

En conclusion, les résultats obtenus montrent l'innocuité sur le plan toxicologique du KI administré à 1mg/kg toutes les 24h pendant 4 jours ou 8 jours. Ces résultats très encourageants nous permettent ainsi d'effectuer de nouvelles expériences en utilisant le schéma prophylactique de 1mg/Kg/24h pendant 8 jours avec une observance des effets 30 jours post-prophylaxie. Les résultats de cette nouvelle étude serviront de données d'entrée pour la mise en œuvre des études de toxicologie en condition BPL qui devraient conduire à une évolution de l'AMM du KI.



Protocole expérimental de la prophylaxie répétée du KI chez les rats adultes

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
Financement de thèse :	IRSN - IFREMER
Directeur de thèse :	Pascal Bailly du Bois IRSN ; Pascal Lazure IFREMER
Tuteur de thèse :	Pascal Bailly du Bois IRSN ; Pascal Lazure IFREMER ; Franck Dumas IFREMER
Ecole doctorale :	Université de Bretagne Occidentale Ecole Doctorale des Sciences de la Mer (EDSM)

La maîtrise du risque nucléaire nécessite d'appréhender les différents mécanismes de transfert et de mélange des radionucléides dans l'environnement. En ce qui concerne l'environnement marin la connaissance de la dispersion et du devenir des rejets contrôlés ou accidentels est un axe essentiel pour ce milieu, l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima en est l'illustration.

Cette connaissance n'existant pas pour le golfe de Gascogne, cette thèse s'appuie conjointement sur la mesure du tritium (HTO), un traceur radioactif parfaitement conservatif issu principalement des rejets des centrales nucléaires et sur la modélisation numérique en trois dimensions (modèle MARS 3D, IFREMER) des processus hydrodynamiques dans cette zone.

Les objectifs principaux de cette thèse sont :

- 1) Etablir une chronologie des rejets de tritium dans le golfe de Gascogne à travers les apports de la Loire et de la Gironde ;
- 2) Caractériser et préciser les panaches associés à ces rejets dans le golfe de Gascogne à l'aide de campagnes océanographiques d'opportunités (ASPEX et DYNSEDIM2016) et d'une campagne dédiée en 2016 (PLUME) ;
- 3) Comparer les panaches mesurés et simulés afin d'affiner et de valider le modèle opérationnel de l'Ifremer MARS 3D pour le golfe de Gascogne en caractérisant les mécanismes et les forçages hydrodynamiques représentatifs pour la dispersion à cette échelle.

La connaissance du terme source du tritium dans le golfe de Gascogne est un paramètre clef pour la simulation réaliste de la dispersion. Son estimation nécessite des mesures quotidiennes de tritium en Loire et en Gironde qui en sont les principales sources. Ces mesures sont obtenues à l'aide de deux automates de prélèvements d'échantillons intégrés sur 24h. Ces automates ont été conçus et installés par le LRC en aval des centrales nucléaires sur la Loire (Angers) et à l'embouchure de la Gironde (Royan).

Les concentrations en tritium dans le golfe de Gascogne sont à la limite des méthodes classiques de détection (1Bq/L) et proches du bruit de fond Atlantique ($\approx 0.1\text{Bq/L}$). La mesure du tritium à bas niveau fait appel à des techniques de mesure de tritium à très bas. La différenciation entre le tritium atlantique et celui issu des apports continentaux autorise des comparaisons entre les mesures et les résultats de simulations uniques particulièrement contraignantes pour les modèles (figure 1).

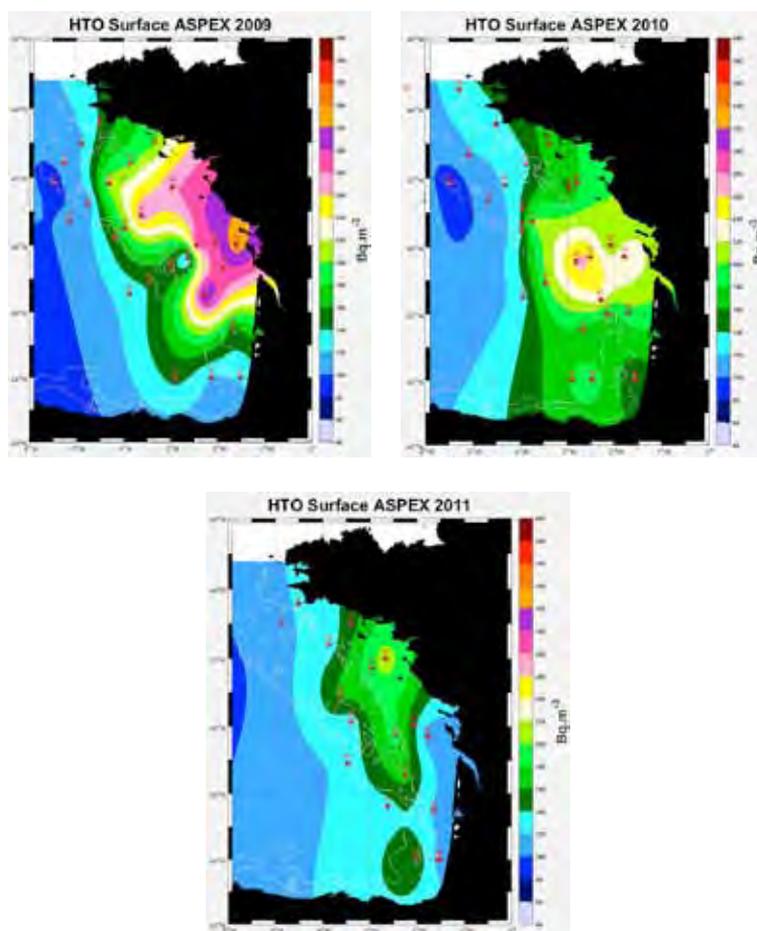


Figure 1. Synthèse des mesures bas niveau de tritium (Bq/m^3) effectuées pendant les campagnes ASPEX (juillet 2009, septembre 2010 et août 2011), montrant une nette signature des panaches à grande échelle

Sujet de la thèse :

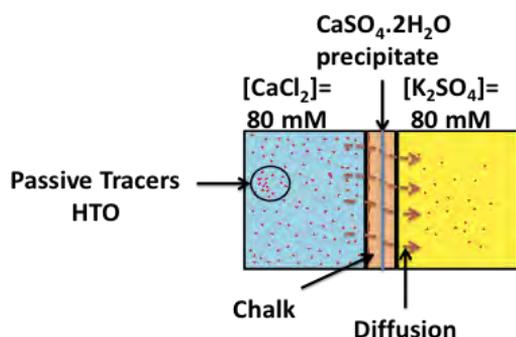
Capacité de prise en compte des perturbations chimiques par les codes couplés chimie-transport : une étude « expérience vs. simulation numérique » de l'impact des panaches salins

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

In the deep geological disposal facility proposed by Andra (the French national radioactive waste management agency), some radioactive wastes may release large amount of soluble salts (NaNO_3 , Na_2SO_4), capable of inducing chemical disequilibria within the barriers (i.e. concrete and clayrocks) and changes in their containment properties due to porosity dissolution/clogging mechanisms.

Therefore, our objective is twofold: (i) quantify such changes induced by the saline plume and (ii) test and improve the robustness of chemical transport codes used for evaluating long term containment properties of such barriers (Hytec code from Mines Paris-Tech and Crunch code from LBNL).

Our methodological approach is based on a bottom-up approach. Simplified experimental systems are used with modeled porous media (e.g. Chalk, glass frit) to investigate one or two physiochemical processes per experiment (i.e. dissolution, precipitation). Afterwards, utilize this approach for more complex porous media, such as compacted clay and claystones where anionic exclusion and cationic exchange mechanisms occur in order to (i) Perform precipitation/dissolution experiments, (ii) Study the chemical osmosis effect without any precipitation induced by a saline plume of NaNO_3 , and (iii) Integrate both chemical osmosis and precipitation phenomena using Na_2SO_4 loading.



Through-diffusion setup with salt loading

This approach would help to test the robustness of chemical transport codes and fix the limits of conventional models that explain the relation between porescale reactions and diffusion. These limits would then help to modify these models which would finally lead for better predictive simulations of the host rock containment properties.

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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Marc BENDERITTER - IRSN
Tuteur de thèse :	Stéphane FLAMANT
Ecole doctorale :	Paris 6/ED394 (Physiologie, Physiopathologie et Thérapeutique)

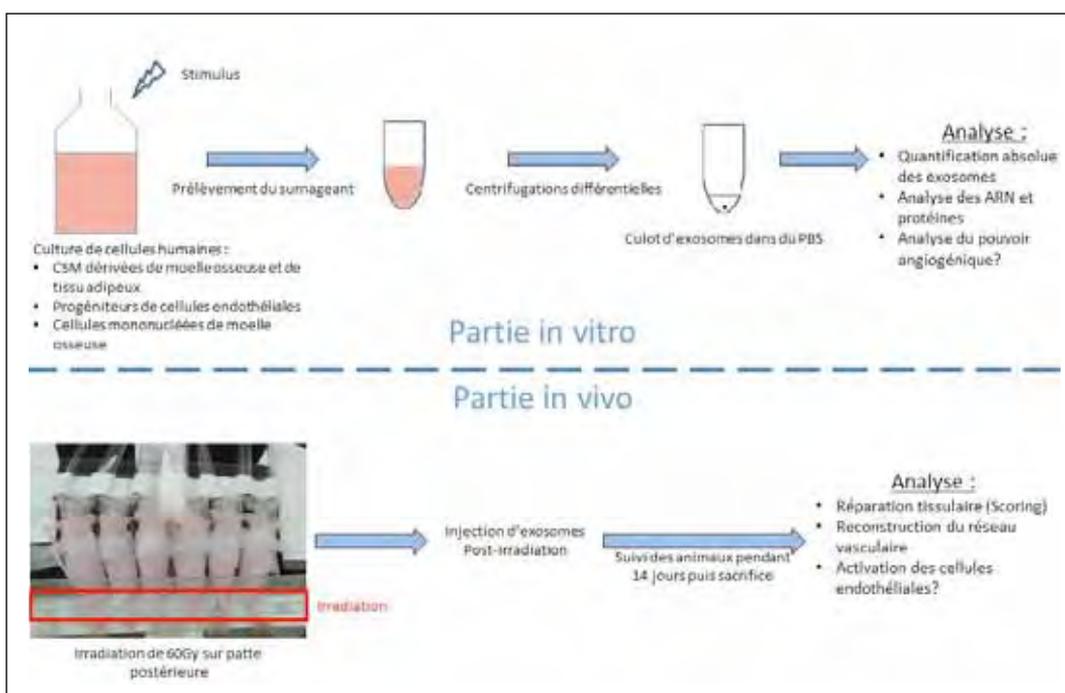
Le potentiel thérapeutique et régénératif des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) pour le traitement des brûlures radiologiques a été démontré dans plusieurs essais cliniques et études précliniques. Les CSM favorisent la réparation du tissu cutané en limitant le syndrome inflammatoire et en inhibant l'expansion progressive du processus fibro-nécrotique consécutifs à une irradiation localisée aiguë à forte dose. Plusieurs travaux ont démontré que l'effet thérapeutique des CSM est principalement assuré par les facteurs paracrines qu'elles sécrètent, dont les exosomes, des nano-vésicules (30-200 nm) d'origine endosomale. Ce constat permet d'envisager une thérapie sans utilisation directe de CSM.

L'objectif de cette thèse est de démontrer l'efficacité thérapeutique des exosomes pour la réparation de lésions radio-induites chez la souris. Celle-ci s'articulera selon deux axes : *in vitro* et *in vivo*.

Nous caractériserons les exosomes produits *in vitro* à partir de culture des CSM issues du tissu adipeux et de la moelle osseuse, ainsi que des progéniteurs de cellules endothéliales et des cellules mononucléées de moelle osseuse. Les exosomes transportent un grand nombre de molécules d'une cellule émettrice vers une cellule réceptrice afin d'influer sur sa fonction. Différents travaux ont montré que ce contenu est spécifique du stimulus appliqué à la cellule émettrice. Nous procéderons ainsi à 1) la quantification des exosomes relargués après application de différents stimuli (hypoxie, déprivation de sérum et différentes doses d'irradiation), 2) la caractérisation de leur contenu moléculaire et 3) l'analyse de leur potentiel thérapeutique au moyen de tests fonctionnels *in vitro* et *ex vivo*.

Nous étudierons également l'effet de l'injection des exosomes sur la réparation tissulaire d'une plaie radio-induite musculo-cutanée chez la souris. La qualité de la peau reconstruite et la fonction vasculaire seront aussi évaluées.

Ce projet permettra d'identifier une ou plusieurs populations d'exosomes dérivés de cellules souches humaines ayant un potentiel thérapeutique *in vitro* et *ex vivo* similaire aux CSM. Les travaux réalisés à l'aide du modèle murin permettront de démontrer l'effet bénéfique de l'injection d'exosomes pour le traitement d'une lésion radio-induite *in vivo*, et poseront les bases du transfert clinique de la thérapie par exosomes pour le traitement des brûlures radiologiques chez l'homme.



Déroulement schématique de la thèse

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
Financement de thèse :	IRSN/Région Aquitaine
Directeur de thèse :	Isabelle Lehecho - IPREM/LCABIE
Tuteur de thèse :	Frédéric Coppin
Ecole doctorale :	UPPA - ED Sciences exactes et leurs applications

L'iode 129, radionucléide présent dans les déchets à Haute Activité à Vie Longue (HAVL), est un isotope d'intérêt dans les études d'impact environnemental des installations nucléaires et des filières de déchets. Dans les écosystèmes terrestres, l'iode peut exister sous différentes formes inorganiques et organiques ayant des comportements environnementaux différents. Bien que la matière organique (MO) semble être le paramètre majeur contrôlant le comportement de l'iode dans les sols, son rôle exact reste encore mal connu. En effet, même si les écosystèmes forestiers couvrent près du tiers du territoire français et européen, le cycle de l'iode, en lien avec le cycle de la MO, n'a pas été étudié dans ce type d'écosystème.

L'objectif de cette thèse est donc d'aboutir à la description quantitative et qualitative des formes chimiques, stocks, flux, temps de résidence de l'iode dans les écosystèmes forestiers (Figure 1).

Pour atteindre cet objectif, la thèse s'articule autour de deux axes.

L'axe 1 s'attachera à étudier la distribution de l'iode entre les compartiments de l'écosystème forestier qui est le résultat de différents processus contrôlant son cycle (e.g absorption foliaire/racinaire, immobilisation dans la biomasse ligneuse, chute de litière, volatilisation, etc.). Ces flux et leur variation dans le temps seront ainsi mesurés ou calculés à partir d'un suivi *in situ* via une mesure des concentrations en iode dans tous les compartiments de l'écosystème forestier.

L'axe 2 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 biodisponibilité de l'iode dans l'humus. La dynamique de ces processus sera quantifiée *via* des approches expérimentales *in situ* et *in vitro* :

- Investigations *in situ* : prélèvement d'échantillons de litières, d'humus et de sols sur plusieurs sites répartis en France afin d'étudier la disponibilité de l'iode pour différents systèmes sol - essence forestière.
- Investigations *in vitro* : mesure du taux de transformation de l'iode (inorganique vs. organique, volatilisation) dans le sol grâce à des systèmes d'incubation permettant le marquage (radioactif ou stable) des litières ou de l'humus.

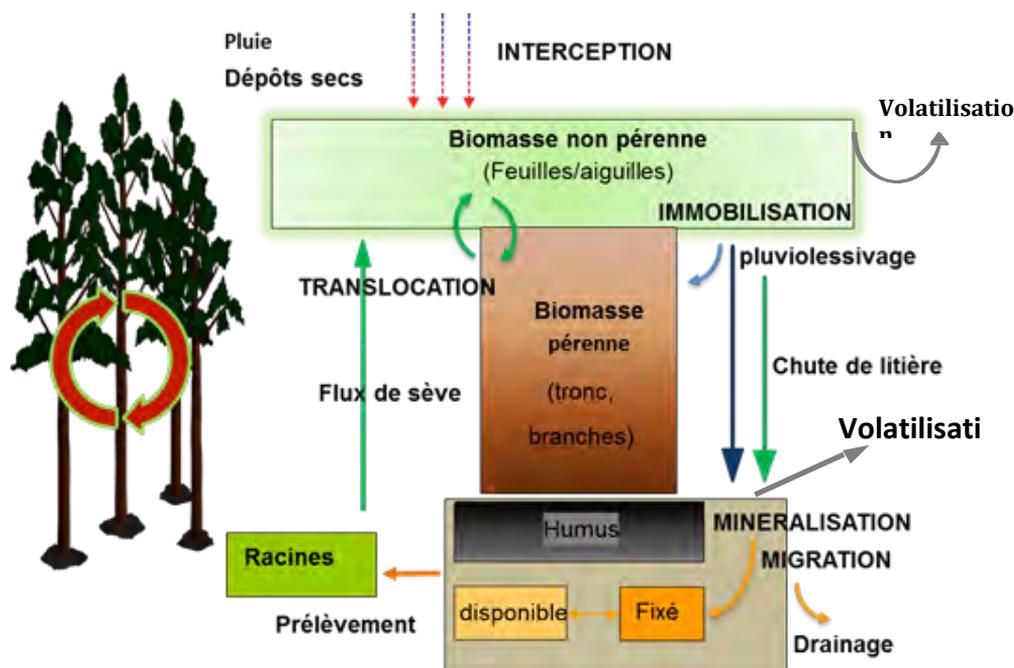


Figure 1. Cycle des radionucléides dans un écosystème forestier

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 :	14/09/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/L3R
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Fabien Milliat - IRSN
Tuteur de thèse :	Fabien Milliat
Ecole doctorale :	Paris VI - Physiologie et physiopathologie - ED 394

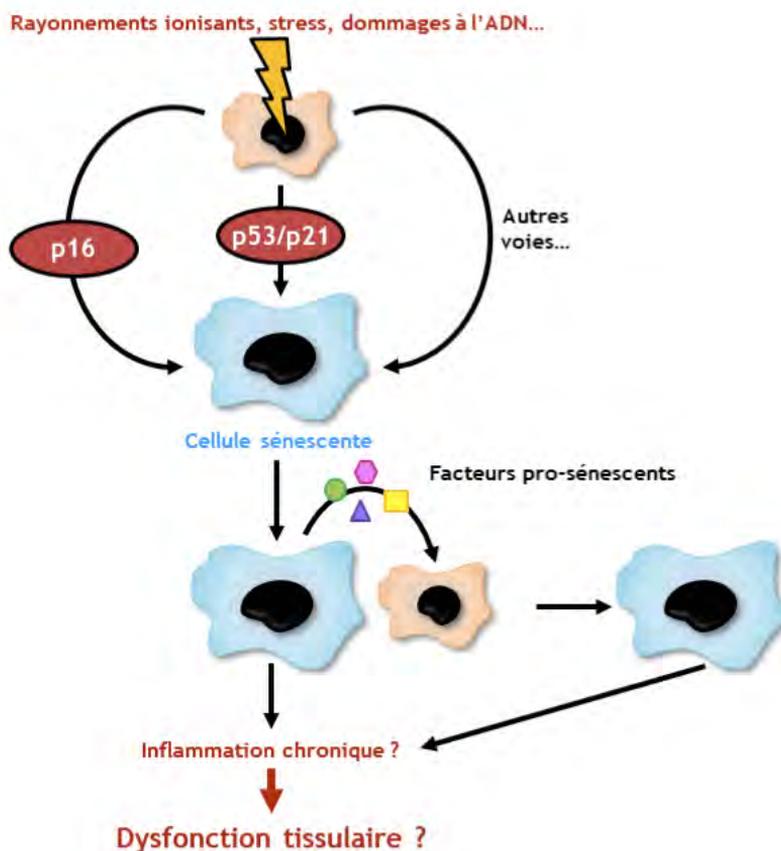
L'un des principaux objectifs du laboratoire est de comprendre le rôle de la dysfonction vasculaire dans l'évolution des lésions radio-induites aux tissus sains dans un contexte de complications après radiothérapie. Suite à l'exposition aux rayonnements ionisants (RI), l'endothélium vasculaire (monocouche de cellules qui tapissent l'intérieur des vaisseaux sanguins) acquiert un phénotype pathologique pro-inflammatoire et pro-coagulant qui contribue à l'évolution des lésions chroniques radio-induites aux tissus sains.

La sénescence correspond à la perte des capacités prolifératives des cellules. Les cellules, dites sénescents, sont arrêtées dans le cycle cellulaire mais restent viables et métaboliquement actives. Ce mécanisme peut être induit par différents facteurs externes et environnementaux, dont l'exposition aux RI. Les cellules sénescents acquièrent une morphologie aplaties et étalées, elles expriment des inhibiteurs du cycle cellulaire ainsi que de nombreux facteurs qui, une fois sécrétés, vont agir sur le microenvironnement. Parmi eux, la protéine PAI-1 (Plasminogen Activator Inhibitor type 1) semble jouer un rôle important car sa dérégulation aurait un rôle protecteur vis-à-vis de la sénescence.

L'objectif de la thèse est d'identifier et de comprendre les mécanismes moléculaires à l'origine de la sénescence endothéliale radio-induite, d'élucider ses relations moléculaires avec l'acquisition d'une dysfonction chronique pathologique et de démontrer son implication *in vivo* dans des modèles précliniques.

Dans l'optique de déterminer la dynamique des acteurs impliqués dans le phénotype sénescents, des cellules endothéliales humaines ont été irradiées et analysées de 1 jour à 3 semaines post-irradiation (7 pas de temps). Une signature transcriptomique de 44 acteurs impliqués dans le mécanisme de sénescence est mesurée afin d'identifier la combinaison de gènes qui potentiellement permettrait d'influencer positivement ou négativement le phénotype sénescents.

Parallèlement, une approche *in vivo* est également menée dans laquelle des souris ont été irradiées par une dose unique de 17 Gy au niveau thoracique. Six mois après exposition, les poumons sont prélevés afin d'identifier et de quantifier la présence de cellules sénescentes au niveau pulmonaire. Pour aller plus loin, des modèles murins invalidés pour PAI-1 spécifiquement au niveau de l'endothélium, développé par le laboratoire, seront utilisés afin d'élucider le rôle de cette protéine dans l'induction de la sénescence radio-induite.



Sujet de la thèse :**Comportement de l'uranium dans les sédiments lacustres en aval d'anciens sites miniers uranifères: mesures spectroscopiques et modélisation géochimique**

Doctorant :	Lucie STETTEN
Date du début de la thèse :	07/09/2015
Laboratoire :	PRP-DGE/SRTG/LT2S et UPMC/IMP/MinEnv
Financement de thèse :	DIM R2DS - Région IDF
Directeur de thèse :	Guillaume Morin/UPMC-CNRS
Tuteur de thèse :	Arnaud Mangeret
Ecole doctorale :	ED Géosciences, Ressources Naturelles, Environnement (ED 398-UPMC)

Les anciennes mines d'uranium représentent une source potentielle de contamination des milieux naturels. En France, plusieurs lacs situés en aval d'anciens sites miniers uranifères sont concernés par des enrichissements en uranium au sein de leurs sédiments. Le piégeage de ce radionucléide dans les sédiments est susceptible de diminuer naturellement sa concentration dans les eaux de surface. L'efficacité et la pérennité de ce piégeage sont toutefois peu documentées à l'heure actuelle et dépendent fortement de la nature et de l'évolution des phases minérales porteuses de l'uranium pendant et après le dépôt des sédiments. La prédiction du comportement de l'uranium dans les sédiments lacustres représente un enjeu scientifique et environnemental important pour permettre une gestion adéquate de ces dépôts.

L'objectif de ce travail de thèse est de déterminer la spéciationⁱ de l'uranium et les processus physico-chimiques qui contrôlent son piégeage dans les dépôts sédimentaires ou son éventuelle remobilisation vers les eaux porales et la colonne d'eau lacustre.

La spectroscopie d'absorption des rayons X sur rayonnement synchrotron (EXAFS, XANES) est mise en œuvre pour déterminer la spéciation de l'uranium dans des échantillons de sédiments prélevés en 2014 et 2015 dans le lac de Saint Clément (Massif Central, France), situé en aval de l'ancien site minier des Bois-Noirs. Les analyses de spéciation en cours montrent une évolution du degré d'oxydation et de l'environnement moléculaire de l'uranium sous l'interface eau-sédiment et sa variabilité à l'échelle du lac. Des extractions chimiques sélectives, ainsi que la synthèse de composés modèles vont permettre de caractériser plus finement la nature des formes chimiques de l'uranium et d'évaluer leur stabilité. La modélisation de ces systèmes naturels, basée sur des codes géochimiques, s'appuiera sur les données de spéciation de l'uranium dans les solides ainsi que sur l'analyse chimique des eaux porales et des sédiments.



Carotte sédimentaire provenant du lac de Saint-Clément prélevée en novembre 2015

ⁱ La spéciation d'un élément est la distribution des espèces chimiques de cet élément dans un environnement physico-chimique donné.

Sujet de la thèse :

Développement d'une chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée pour les références en énergie et en fluence de champs neutroniques de basses énergies (quelques keV à 1 MeV)

Doctorant :	Benjamin TAMPON
Date du début de la thèse :	14/09/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SDE/LMDN
Financement de thèse :	IRSN/LNE
Directeur de thèse :	Daniel Santos - CNRS/LPSC
Tuteur de thèse :	Thibaut Vinchon
Ecole doctorale :	Université Joseph-Fourier - Grenoble 1

Dans le domaine des rayonnements ionisants, les installations produisant des champs neutroniques sont essentielles pour étalonner et étudier des détecteurs de neutrons. Cependant ces champs neutroniques doivent être caractérisés en énergie et en fluence pour être considérés comme des champs de référence. Pour mesurer directement¹ la distribution en énergie de champs neutroniques dont l'énergie est inférieure à 1 MeV, un détecteur gazeux (μ -TPC pour *micro Time Projection Chamber*) est en cours de développement au Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (LMDN).

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'IRSN est également associé au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE), pour les grandeurs neutroniques de référence dont la distribution en énergie de la fluence neutronique.

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 600 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,
- améliorer l'algorithme d'analyse des données en temps de calcul et de le modifier pour les champs étendus,
- réaliser des simulations pour estimer la réponse du système et valider les algorithmes d'analyse,

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

- réaliser des campagnes de mesures sur des installations de référence produisant des champs neutroniques,
- maîtriser les incertitudes associées à chaque paramètre et les propager aux grandeurs d'intérêt,
- obtenir un fonctionnement en routine du dispositif au sein du LMDN.



Figure 1. Le détecteur μ TPC

Lors de ces six premiers mois, quelques objectifs ont déjà été remplis

- L'algorithme de données est opérationnel pour l'analyse de champs étendus,
- La procédure d'étalonnage a été complétée pour les énergies autour du MeV,
- Deux campagnes de mesure ont été réalisées : une à Legnaro (Italie) pour étudier la réaction ${}^9\text{Be}(d,n)$ et une sur l'installation CEZANE du LMDN devant une source de ${}^{252}\text{Cf}$.

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

Doctorant :	Nicolas TKATCHENKO
Date du début de la thèse :	21/09/2015
Laboratoire :	PRP-HOM/SDE/LDRI
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Didier Gourier - Chimie ParisTech
Tuteur de thèse :	François Trompier
Ecole doctorale :	UPMC/ED 397

Ce sujet 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 très souvent impossible ou extrêmement compliqué d'estimer les doses reçues. Localement, les doses peuvent atteindre plusieurs dizaines de grays, comme par exemple, dans le cas de préhension de sources radioactives.

L'IRSN a développé une approche innovante basée sur la quantification dans les ongles des radicaux libres induits par l'irradiation par spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE). Des premiers protocoles ont permis de réaliser les premières expertises pour le compte de REACTS (USA) et de l'AIEA.

Si cette approche présente de nombreux avantages, facilité du prélèvement, stabilité du signal et la possibilité d'établir une cartographie de la dose absorbée aux extrémités, l'analyse des spectres RPE s'avère être très complexe et de nombreux paramètres influent sur la production et la stabilité des radicaux mesurés. En effet, le spectre RPE d'un échantillon d'ongle irradié présente deux signaux de signatures identiques : un endogène (BKS) sensible à l'humidité et variable d'un individu à l'autre, et un radio-induit (RIS) stable mais de faible intensité (Figure 1).

Tout l'enjeu réside dans la caractérisation des entités chimiques qui leur sont associées afin de pouvoir développer des méthodes pour séparer les différentes composantes du spectre et extraire l'information dosimétrique. Dans cette optique, des techniques d'analyses complémentaires (spectroscopie de masse, RMN, RPE pulsée et haute fréquence...) pourront être utilisées. De plus, une étude sur la variabilité des signaux et l'influence des paramètres extérieurs (température, humidité, exposition UV, vernis, durcisseur...) est actuellement menée. Il s'agit d'améliorer les protocoles existants uniquement dédiés au fortes doses (> 10 Gy) et d'en proposer un nouveau pour les plus faibles doses.

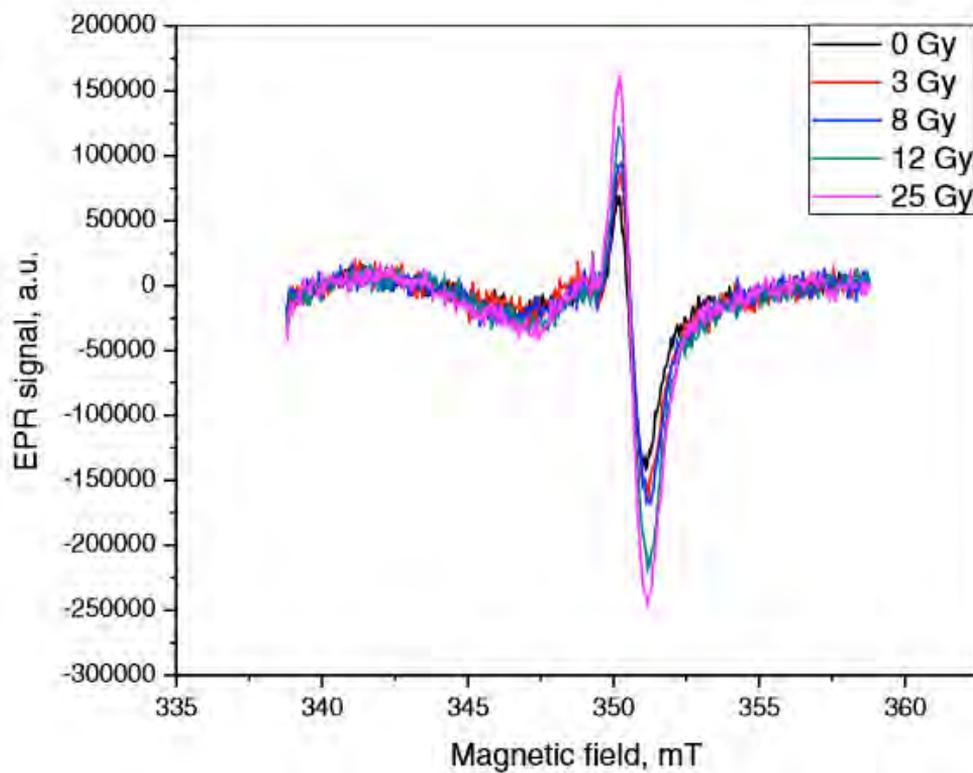


Fig. 1 Exemple de spectres RPE réalisés en bande X (9 GHz) sur un échantillon d'ongles avant (signal endogène) et après irradiation (signaux radio-induits)

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

Doctorant :	Mohamed BELERRAJOL
Date du début de la thèse :	02/10/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SA2I/LIE
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Michel Quintard et Yohan Davit (IMFT)
Tuteur de thèse :	Fabien DUVAL
Ecole doctorale :	Toulouse - SDU2E

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 étudié 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 graphite et de tungstène ou de béryllium remises en suspension dans le tore ITER en cas d'accident de perte de vide.

Le problème considéré est un problème de combustion d'un mélange gaz-particules (réactions hétérogènes et homogènes couplées) en présence de rayonnement pour lequel il s'agit de développer un modèle de vitesse de flamme. Les développements sont menés dans le cadre d'une description multi-échelle, de l'échelle de particule à l'échelle de description macroscopique des outils d'évaluation réacteur. Le modèle de combustion associé à l'échelle macroscopique correspond, de manière analogue à ce qui est fait pour la combustion turbulente en l'absence de particules, à un modèle basé sur une description géométrique du front de flamme (modèle de type G-équation) pour lequel une fermeture doit être proposée pour la vitesse de flamme. La plupart des corrélations de vitesse de flamme se présentant sous la forme d'un produit de la vitesse de flamme laminaire par un terme correctif pour prendre en compte la turbulence, on développe dans ce travail un modèle de vitesse de flamme laminaire en fonction des caractéristiques du milieu (taille des particules, chargement, ...). Ce modèle est construit sur la base de simulations numériques à une échelle de description intermédiaire, dite mésoscopique, selon une approche Euler-Lagrange.

Sujet de la thèse :**Analysis of the Propagation of Hydrogen-air-vapor Flame
in presence of Water Droplets**

Doctorant :	Roberto CARUSO
Date du début de la thèse :	02/11/2015
Laboratoire :	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR
Financement de thèse :	Projet ANR MITHYGENE
Directeur de thèse :	Nabiha Chaumeix, CNRS Orleans
Tuteur de la thèse :	Ahmed Bentaib
Ecole doctorale :	Orléans - Sciences et technologie

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.

The purpose of this research work is to establish the fundamental proprieties of the interactions between Hydrogen-Air-Vapor Flame and Water droplets, through dedicated experiments.

Experimental investigations will be conducted in order to make clear the effects of the WS features variations on the Hydrogen flame propagation by using Advanced Optical Diagnostics: Schlieren Technique, Tomography and Particle Image Velocimetry.

Experimental Proof can be collected through a new facility, ENAFEC-2 (ENceinte d'ACCElération de Flamme, ICARE-Orléans), who can sustain 200°C and 120 bar, highly instrumented with photomultipliers to follow the propagation of the flame. The apparatus is composed by a vertical pipe 7.65 m high with an internal diameter of 230 mm, equipped with obstacles with different shapes and dimensions. The flow field and the flame shape will be characterized by advanced high speed imaging techniques as well as high speed laser velocimetry.

The perspective of this work is to enhance the knowledge about the effect of the variation of Spray's features as Droplets Diameter, Droplets Velocity, Density Flux 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 :**Modélisation atomistique de la fragilisation des gaines combustibles nucléaires par les hydrures**

Doctorant :	Paul EYMEUD
Date du début de la thèse :	05/10/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LPTM
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Guy TREGLIA
Tuteur de thèse :	Fabienne RIBEIRO
Ecole doctorale :	Aix-Marseille Université / ED 352

L'alliage de zirconium constitutif des gaines des crayons combustibles mis en œuvre dans les réacteurs à eau pressurisée est oxydé en surface par l'eau, conduisant à la création d'hydrogène par dissociation des molécules d'eau. Une partie de cet hydrogène est absorbé au cœur de la gaine. Positionnés dans les sites interstitiels de la matrice de zirconium, les atomes d'hydrogène sont initialement en solution solide. Lorsque la concentration en hydrogène atteint la limite de solubilité, l'hydrogène forme des précipités d'hydrures au sein du réseau (cf figure). Ces hydrures fragilisent le matériau en abaissant sa ductilité et sa limite de rupture. Ils peuvent également être le lieu d'amorçage de fissures. Ceci constitue un enjeu de sûreté nucléaire, car l'intégrité de la gaine, première barrière de sûreté confinant la matière radioactive, doit être assurée durant l'ensemble de la vie en réacteur des crayons combustibles, puis lors de leur transport et de leur entreposage.



Figure 1. Coupe d'une gaine hydrurée (analyse post-mortem) X. Iltis et al. – NT CWL n°2005-75

Il est donc fondamental de bien comprendre les mécanismes régissant les précipitations et la dissolution des hydrures de zirconium sur une gamme étendue de temps, de température et de contraintes mécaniques.

Bien que de nombreuses investigations expérimentales et théoriques aient été menées depuis plusieurs décennies, nombreuses sont les contradictions et incertitudes quant à la nature, la stabilité et les cinétiques de transformation de ces hydrures. Les objectifs de mon travail de thèse découlent alors naturellement de ces interrogations : il s'agira en premier lieu de clarifier les diagrammes de phase des hydrures de zirconium (simulations Monte-Carlo d'équilibre dans l'ensemble grand-canonique) pour lesquels de nombreuses zones d'ombre persistent, puis d'étudier la cinétique des transitions de phase, en particulier le phénomène de dissolution/remise en solution (simulations Monte-Carlo cinétique), et enfin de comprendre et de quantifier le lien entre précipité

d'hydrures et contraintes locales dans le métal (simulations en Dynamique Moléculaire). Mener à bien ces simulations numériques nécessite de disposer de potentiels interatomiques fiables. Je dispose pour cela d'une méthodologie globale de dérivation de potentiels à *N-corps* dans l'approximation des Liaisons Fortes, prenant en compte l'hybridation entre électrons s, p et d, développée par Alice Dufresne, précédente doctorante à l'IRSN.

Concernant l'avancement de mon travail, outre la recherche bibliographique, je procède actuellement au développement d'un modèle énergétique de type « Ising effectif », visant à la détermination d'interactions de paires effectives, à partir d'énergies de cohésion calculées dans le cadre du potentiel précédemment évoqué pour différentes configurations et concentrations d'hydrures. L'objectif est de justifier la pertinence d'un tel modèle qui permettra de traiter les effets couplés d'ordre chimique et de contraintes sur un réseau rigide, tant à l'équilibre que du point de vue cinétique, et d'accéder ainsi à des échelles de distance, de temps et d'espace infiniment plus étendues qu'avec les potentiels à N-corps. Ces interactions effectives seront ensuite introduites dans un programme de simulation Monte-Carlo dans l'ensemble grand-canonique pour déterminer le diagramme de phase de Zr-H.

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
Financement de thèse :	Lille 1/IRSN
Directeur de thèse :	Florent Louis PC2A ; Valérie Fèvre-Nollet PC2A
Tuteur de thèse :	Frédéric Cousin
Encadrants :	Patrick Lebègue PC2A ; Laurent Cantrel
Ecole doctorale :	Université Lille 1/SMRE

En cas d'accident grave sur un réacteur de centrale nucléaire, des quantités importantes de radionucléides peuvent être relâchées dans l'environnement. L'iode est un de ces radionucléides et peut avoir des conséquences dramatiques par inhalation, ingestion ou contact. Des modèles informatiques sont développés pour prédire les rejets dans ces situations. Lors de l'accident de Fukushima, les prédictions établies par ces modèles n'étaient pas en accord avec les données mesurées sur le terrain pour l'iode car seul le transport et la diffusion ont été pris en compte. Dans la thèse de J. Trincal (thèse IRSN 2012-2015), un mécanisme de l'iode en phase gazeuse a été construit ce qui a permis de mieux mettre en évidence la réactivité complexe de l'iode dans l'atmosphère.

Suite à ces premiers travaux, l'objectif de ma thèse est d'approfondir l'étude du mécanisme de l'iode en y ajoutant les réactions en phase particulaire, ce qui devrait permettre d'interpréter l'accident de Fukushima par comparaison avec les données mesurées de dépôts.

Une étude bibliographique a permis de collecter les réactions entre les halogènes (iode, brome, chlore) et les particules solides et liquides dans l'atmosphère à l'aide de bases de données (IUPAC, NIST, ...) et par revue de la littérature. Pour chaque réaction, les paramètres cinétiques sont analysés en fonction des critères suivants : suivi des recommandations, origine des valeurs (expérience, calculs théoriques, estimation), domaine de validité des mesures (pression, température). Les espèces présentes dans la figure 1 sont celles qui réagissent ou condensent à la surface des aérosols.

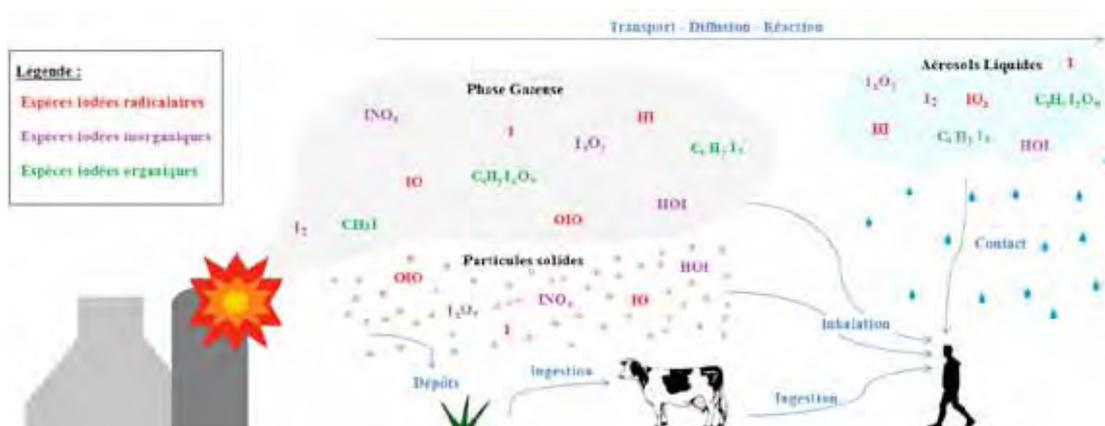


Figure 1. Schéma représentatif de la contamination des populations suite à un rejet d'iode vers l'environnement

Une première étude a été effectuée avec le code ASTEC/SOPHAEROS en 0D afin d'estimer l'influence de la température (200-300 K) et de l'incertitude de la constante de vitesse sur la masse d'aérosol produite pour la réaction d'absorption $\text{HOI}_{\text{gaz}} \rightarrow \text{HOI}_{\text{particules}}$.

Par la suite, cette étude sera élargie aux autres réactions iode/aérosol. Le mécanisme développé en phase gaz-solide sera intégré aux modèles de chimie-transport Polair3D et Chimère.

Enfin, un re-calcul du transport de l'iode lors de l'accident de Fukushima sera effectué avec une comparaison aux données mesurées.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du laboratoire commun C³R IRSN/CNRS/Lille1.

Sujet de la thèse :**Experimental Investigation Ag-In-Zr thermodynamic phases at high temperatures**

Doctorant :	Kasi Visweswara Siva Sai GAJAVALLI
Date du début de la thèse :	15/10/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Jacques ROGEZ - CNRS - Marseille
Tuteur de thèse :	Marc BARRACHIN
Ecole doctorale :	Aix Marseille University, Physique et Sciences de la Matière - ED 352

In the occurrence of a severe accident with loss of coolant on a PWR, the silver-indium-cadmium (SIC) absorbing alloy which constitutes the control rods is likely to liquefy and to interact around 1500 K with their Zircaloy-4 guide tubes. During the degradation of the control rod and the core progression, SIC released under gaseous or aerosol forms can associate with iodine which is a fission product of prime importance for the evaluation of the source term. The thermodynamic study of the liquid phase is a necessary step for a reliable estimate of the vaporization of the chemical elements of the absorber material and of the corium progression. The Ag-In phase diagram is well established in the literature and the investigation of the Ag-Zr system was carried out in the A. Decreton's thesis, whereas the In-Zr and the Ag-In-Zr chemical systems are partially unknown. The aim of the thesis is to bring forth an experimental contribution to thermodynamics of these systems.

The indium-zirconium system (Fig: 1) exhibits various intermetallic compounds. The objective is to elaborate them and subsequently measure their standard enthalpies of formation by dissolution calorimetry. Previous studies have indicated serious concerns in the achieving the first task due to immiscibility of zirconium and Indium at high temperature and other experimental difficulties associated with Zr and In (high affinity with oxygen and reaction with most of crucible materials for Zr). We begin our work by investigating the possibility to use liquid Al for Zr dissolution at high temperatures in order to find a suitable solvent for dissolution calorimetry. Previous studies have shown the formation of Al₃Zr precipitates at 723°C due to slow dissolution kinetics of Zr in Al. Contradicting the predictions, we have found that similar problems exist at 900°C (Fig: 2). Further calorimetry experiments are being carried with different solvents such as tin. The results are encouraging so far. In parallel, we have experimentally established a temperature variation of partial enthalpy of silver in liquid aluminum. The results correlate the previous data and confirm the deviation from the literature values. The overall consistency of the new results with comparison to the literature will be tested by means of a thermodynamic optimization following the CALPHAD method.

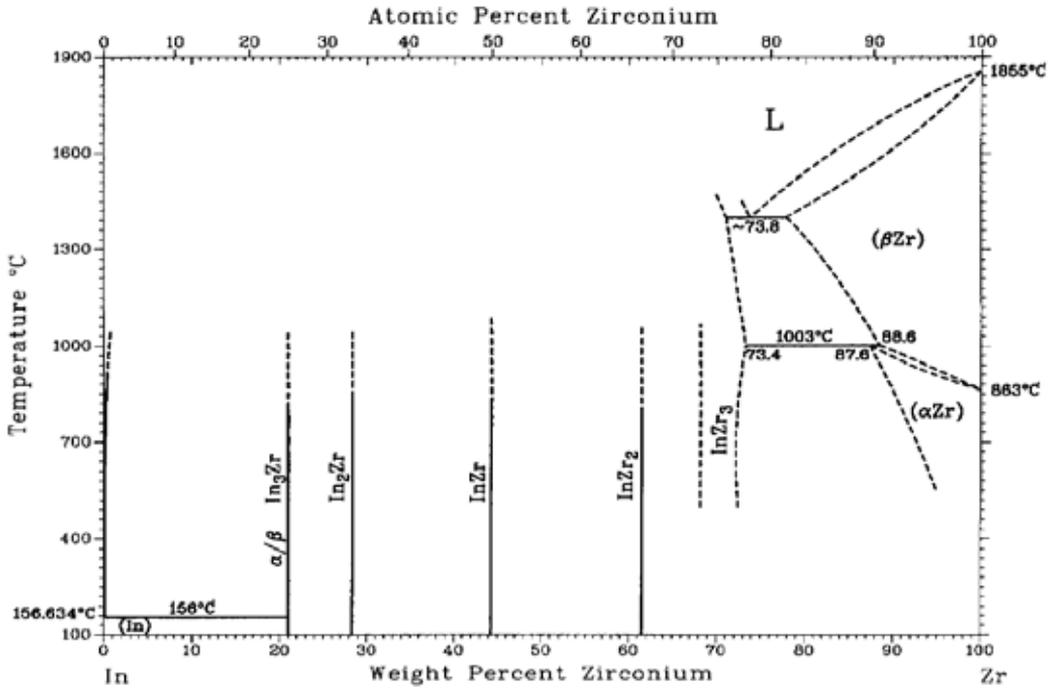


Fig1. State of the art of the diagram of In-Zr

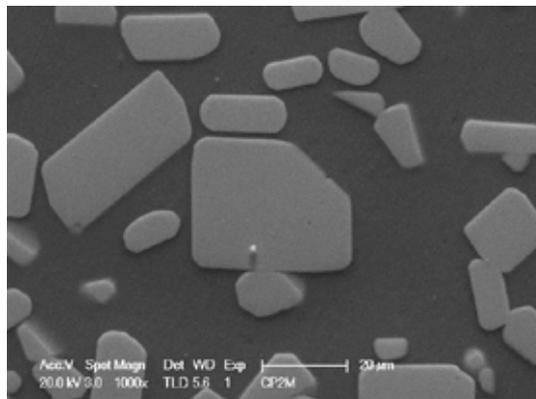


Fig2: Al₃Zr precipitates at 900°C

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
Financement de thèse :	ANR DENOPI
Directeur de thèse :	Michèle Pijolat - EMSE
Tuteur de thèse :	Olivia Coindreau
Ecole doctorale :	Saint-Etienne - Sciences, Ingénierie, Santé

La piscine de désactivation permet de stocker le combustible nucléaire utilisé dans l'attente que sa puissance résiduelle soit suffisamment faible pour permettre son évacuation définitive hors du site. Lors d'un accident, une perte de refroidissement pourrait conduire au dénoyage et à l'échauffement des assemblages de combustible. Puis, si aucune mesure n'est prise, à l'emballement de la réaction d'oxydation par la vapeur d'eau et par l'air du gainage des crayons combustible. Une dégradation des crayons pourrait provoquer le relâchement des produits radioactifs.

Nos travaux portent sur l'étude des phénomènes d'oxydation de la gaine combustible en alliage de zirconium (Zircaloy-4) à haute température dans une atmosphère gazeuse composée d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau. Les échantillons étudiés sont de petites plaquettes de Zircaloy-4 recouvertes d'une couche d'oxyde qui simule celle formée par la corrosion sous eau en réacteur. L'épaisseur de cette couche d'oxyde, formée en four à 425°C sous O₂ humidifié pendant 250 jours est de 30 µm. Le but de nos travaux est de déterminer les mécanismes d'oxydation du Zircaloy-4 pré-oxydé et d'acquies des données cinétiques qui permettront d'établir le modèle cinétique.

La prise de masse due à l'oxydation des échantillons a été mesurée grâce à une thermobalance. Les essais réalisés en palier isotherme à 850°C sous air et vapeur d'eau confirment l'effet néfaste de l'azote lorsqu'il est associé à l'oxygène et/ou à la vapeur d'eau, que les plaquettes soient vierges ou pré-oxydées. Le couplage de l'analyse thermogravimétrique (ATG) avec un spectromètre de masse (SM) implanté en ligne permet de détecter le dégagement d'hydrogène dans le cas de l'oxydation par la vapeur d'eau en bonne corrélation avec la vitesse de prise de masse de l'échantillon (Fig.1).

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, spectrométrie à décharge luminescence et dosage de l'hydrogène seront conduits sous air et différentes pressions partielles de vapeur d'eau. Ils devront nous permettre de proposer un modèle cinétique capable de décrire la vitesse d'oxydation des gaines pré-oxydées en fonction des différents paramètres (température, pression partielle de vapeur d'eau...).

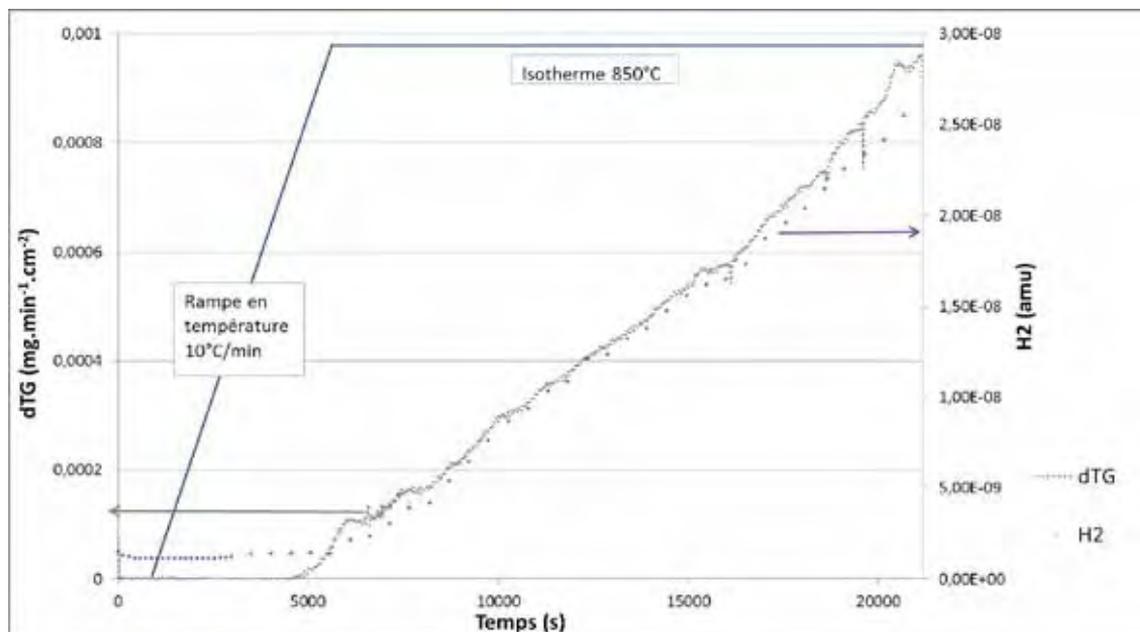


Figure 1.
 Vitesse de prise de masse (ATG) et mesure du relâchement d'hydrogène (SM) d'un échantillon de Zircaloy-4 pré-oxydé après traitement thermique à 850°C sous 50 hPa H₂O et 32 hPa N₂

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
Financement de thèse :	ANR Agoras
Directeur de thèse :	Soraya BOUDIA - Université Paris Descartes
Tuteur de thèse :	Olivier CHANTON
Ecole doctorale :	Sorbonne Cité Paris - Sciences humaines et sociales : cultures, individus, sociétés - ED 180

Les accidents nucléaires ont largement remis en cause les principes de la sûreté nucléaire, notamment en montrant que l'hypothèse d'un accident grave est plausible.

L'objectif de cette thèse est de 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. Le *corium* se forme lors d'un accident nucléaire grave avec fusion du cœur. Ce magma est le produit de la fusion et de l'oxydation du combustible qui se combine avec les éléments qu'il rencontre (barres de contrôle, éléments internes de la cuve, acier de la cuve, béton du radier...). Cet objet dont l'évolution est imprévisible et empreint d'incertitudes mobilise de nombreux questionnements posés par les "*Sciences Studies*" autour des incertitudes, de l'imprévisibilité ou de la matérialité de l'activité scientifique. Le travail de thèse s'articulera autour de deux axes principaux. Il s'agira d'examiner dans un premier temps la constitution d'un corpus de connaissances autour de cet objet en mettant en évidence les débats et questionnements qui subsistent toujours aujourd'hui, notamment s'agissant de sa modélisation.

Il s'agira dans un second temps de s'intéresser à la manière dont ces connaissances et incertitudes sont mobilisées dans le cadre de l'expertise et du processus pratique de prise de décision, particulièrement au travers des moments de « dialogue technique ».

Sujet de la thèse :

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

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

Cette thèse se place 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 avec des pentes importantes (12%). Les déchets radioactifs sont stockés dans des alvéoles transverses à la galerie principale. La présence de matière hautement radioactive entraîne un risque incendie important et la complexité de l'installation rend la gestion d'un éventuel départ de feu délicate. La maîtrise de ce risque est donc primordiale afin de limiter les dégâts que pourrait occasionner un incendie. Pour répondre à cette problématique, des essais sont prévus sur une maquette aéraulique d'un tunnel à échelle réduite installée à l'IUSTI. La maquette permet un contrôle de la pente ($\pm 20\%$) et donc de caractériser les différents régimes pouvant exister (effet cheminée, stratification). 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 de fumées générées par un feu.

Le contrôle de la masse volumique à l'injection permet de considérer les cas Boussinesq (faible écart de masse volumique) et les cas non-Boussinesq (fort écart de masse volumique). Des mesures seront réalisées afin de constituer une base de données permettant de valider les codes CFD. Un ajout de tronçons transverses au tunnel est prévu et permettra de représenter les alvéoles de stockage des déchets. Les essais permettront de déterminer des temps caractéristiques de propagation, de dilution et de mélange des fumées.

Une première campagne d'essais préliminaires a été réalisée afin de qualifier le dispositif. L'objectif de cette étude est de caractériser la vitesse de propagation des fumées d'un local entièrement rempli en fonction de la différence de masse volumique. Ces essais sont de type Lock-Exchange. Une tirette permet de séparer l'air contaminé de l'air frais. Elle est ouverte à l'instant initial et la propagation des fumées est enregistrée par vidéo. Un régime inertiel et un régime visqueux ont pu être mis en évidence dans la propagation des fumées dans le tunnel.



Sujet de la thèse :

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

[Experimental and theoretical studies of light water effective thermal scattering kernel $S(\alpha,\beta)$]

Doctorant :	Vaibhav JAISWAL
Date du début de la thèse :	01/10/2015
Laboratoire :	PSN - EXP/SNC/LNR
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Valérie Vallet, Université de Lille,
Tuteur de thèse :	Luiz Leal
Ecole doctorale :	Lille - Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement

Nuclear cross section libraries use derived thermal neutron scattering represented by scattering kernel $S(\alpha,\beta)$ where α and β stand for the unit-less momentum and energy transfers respectively. The available $S(\alpha,\beta)$ of light water in the evaluated data libraries are based on physics models and experimental data measured in the sixties with a low accuracy due to limitations of the experimental and computational capabilities. $S(\alpha,\beta)$ is analogous to the scattering function $S(q,\omega)$ which describes the microscopic dynamics of a scattering system, where q is the neutron momentum transfer and ω is the neutron energy transfer. $S(q,\omega)$ for light water can be directly measured by performing time-of-flight inelastic thermal neutron scattering experiment in order to avoid approximations and thus possibly enhance the reliability of $S(\alpha,\beta)$ and accuracy of the thermal scattering cross section.

Improved $S(q,\omega)$ and thermal scattering cross section of light water at ambient temperature and pressure have been successfully carried out at Institut Laue-Langevin (ILL). The first part of my work was to extend the previous measurements beyond room temperature and pressure, to more realistic operating conditions in connection with nuclear power reactors. In order to accomplish this, two consecutive inelastic thermal neutron scattering experiments was performed with light water for several high temperatures and pressures using high resolution time-of-flight spectrometers, IN4c and IN6 at ILL in 2015. Data reduction of the raw experimental data to obtain $S(q,\omega)$ is under process (Figure). $S(q,\omega)$ will then be transformed into $S(\alpha,\beta)$ to calculate the double differential thermal neutron scattering cross section. The final result will focus on the effect of temperature and pressure on the thermal scattering kernel $S(\alpha,\beta)$ of light water and its impact on integral experiments.

Further, the evaluation of the experimental data will provide grounds to obtain the uncertainties associated with the experimental conditions in connection with the measurements, namely the systematic and the statistical uncertainties. Due to kinematic restrictions and limited angular range of detectors, $S(q,\omega)$ is measured only in a limited region of the (q,ω) space. Hence, possible use of molecular dynamics codes will be investigated to access $S(q,\omega)$ over a wider range.

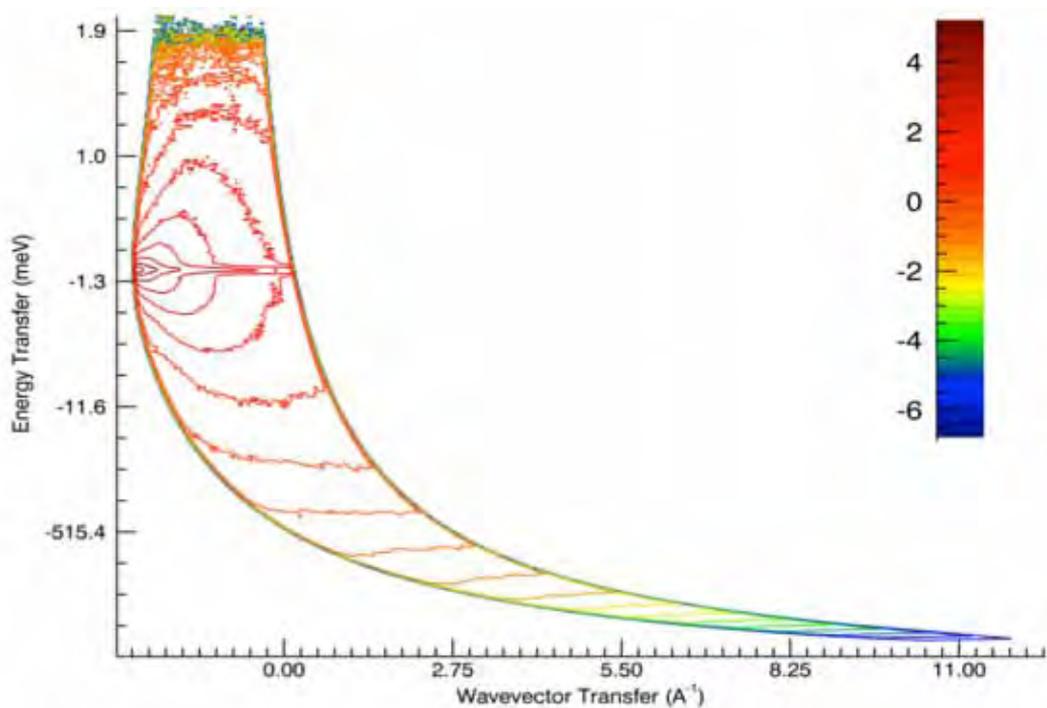


Figure. $S(q,\omega)$ contour plot of light water at 494 kelvin and 70 bar

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 - RES/SEMIA/LPTM
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Mihail GARAJEU - CNRS/LMA ; Martin IDIART - UNLP
Tuteur de thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Ecole doctorale :	ED 353 Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (AIX-Marseille)

Contexte

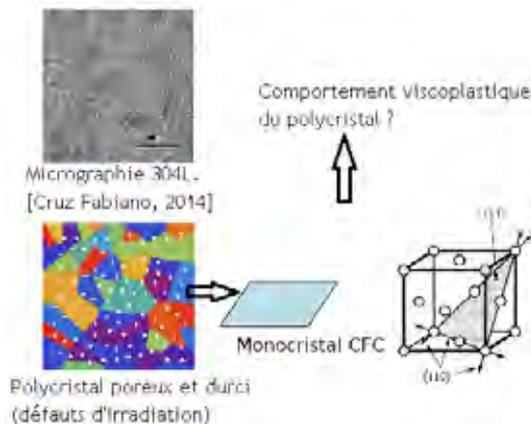
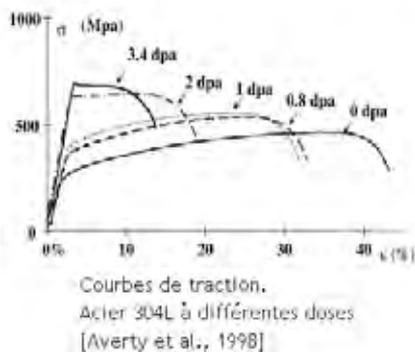
Ce travail concerne l'étude du vieillissement des internes de cuve dans les réacteurs à eau sous pression. Les internes sont principalement des pièces en aciers inoxydables austénitiques, situées à l'intérieur de la cuve. Le terme « vieillissement » est relatif à l'ensemble des mécanismes qui modifient, en temps, les caractéristiques initiales de ces matériaux. La microstructure de ces matériaux évolue fortement durant leur utilisation en réacteur : présence de défauts, de boucles de dislocation. De plus, des cavités peuvent apparaître à l'intérieur de la structure polycristalline de ces matériaux (cavités intragranulaires). La présence de défauts d'irradiation et leurs interactions conduisent tout d'abord à un durcissement de ces aciers. Il semble que ce phénomène ait tendance à saturer pour une dose d'irradiation assez faible (par rapport aux doses atteintes à 40 ans).

Objectifs

Des lois constitutives sont proposées dans la littérature à l'échelle du grain (lois cristallines) pour le comportement élasto-viscoplastique de ces aciers irradiés. Ces lois prennent en compte le durcissement d'irradiation (dû à la présence de certains défauts dans le matériau). Cette thèse vise à étudier l'effet de la présence de cavités intragranulaires sur le comportement élasto-viscoplastique global d'un acier austénitique irradié. Elle doit proposer un modèle basé sur une méthode de changements d'échelles en mécanique des matériaux. L'objectif est d'estimer l'effet d'une porosité donnée sur la contrainte maximale apparente du matériau et la déformation critique associée. Des simulations numériques sont prévues avec le logiciel CRAFT permettant de calculer la réponse mécanique d'un matériau hétérogène (méthode FFT, Transformation de Fourier rapide).

Résultats et perspectives

Une loi cristalline a été retenue. Elle fait intervenir un grand nombre de variables internes (densités des dislocations, des boucles) qui évoluent au cours du chargement. La présence des cavités va influencer l'évolution des variables internes et devrait induire de fortes hétérogénéités de la déformation dans les grains du polycristal, conduisant à des grains fortement hétérogènes. Des calculs préliminaires avec CRAFT sur polycristal dense ont été effectués avec une loi cristalline simplifiée. L'implémentation de la loi cristalline pour un acier austénitique irradié dans CRAFT se poursuit. Certains résultats de ces travaux seront valorisés dans le projet européen SOTERIA.



Etude du comportement viscoplastique d'un polycristal poreux et durci (défauts d'irradiation)

Sujet de la thèse :**Etude 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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Cécile Vallières - LRGP/Université de Nancy I
Tuteur de thèse :	François-Xavier Ouf
Ecole doctorale :	Nancy I - Ressources, Procédés, Produits et Environnement RP2E - ED 410

En cas d'incendie dans une installation nucléaire, les filtres à très haute efficacité (THE), présents sur les réseaux de ventilation de l'installation, seront fortement sollicités. Les particules émises lors de cette situation forment, en effet, un « gâteau » nanostructuré à la surface de ces filtres, qui donne lieu à une augmentation de la résistance aéraulique des filtres, modifiant ainsi les conditions de pression et de ventilation dans l'installation.

Dans le cadre de l'amélioration du code de calcul SYLVIA, l'IRSN développe des modèles prédictifs de colmatage des filtres THE. Des modèles ont déjà été développés pour des aérosols d'incendie ne présentant pas de phases condensées significatives. Cependant, lors d'un incendie, de fortes interactions se produisent entre les suies et les vapeurs/gaz, notamment la vapeur d'eau. Ces interactions peuvent modifier la structure des aérosols et la résistance aéraulique du gâteau de suies. Il convient donc de développer un modèle permettant d'estimer la quantité d'espèces sorbées à la surface des aérosols ainsi que son influence sur le colmatage des filtres THE.

L'objectif de ma thèse est de développer un modèle de sorption de l'eau sur des suies d'incendies. Pour ce faire, des suies seront produites à partir de différents combustibles représentatifs des INB, ceci à différentes concentrations en oxygène et à différentes échelles. Ces suies seront caractérisées en termes de morphologie, granulométrie, structure et composition chimique. Cette première partie permettra de relier les propriétés physicochimiques des suies aux paramètres d'incendie.

Des isothermes de sorption de l'eau seront ensuite déterminées afin d'améliorer nos connaissances sur l'hygroscopicité des suies. Les résultats attendus sont des isothermes significativement différentes selon la nature du combustible utilisé pour produire les suies. Les isothermes obtenues dans le cadre d'une collaboration LPMA-LRGP (Figure 1) mettent ainsi en évidence une meilleure affinité avec l'eau des suies issues de matériaux représentatifs des INB que celles issues de brûleurs à gaz (CAST).

Ces deux étapes permettront d'alimenter la dernière partie de la thèse qui consiste à développer un modèle de sorption dans lequel apparaîtront les propriétés physicochimiques des suies jouant un rôle prépondérant dans ce phénomène.

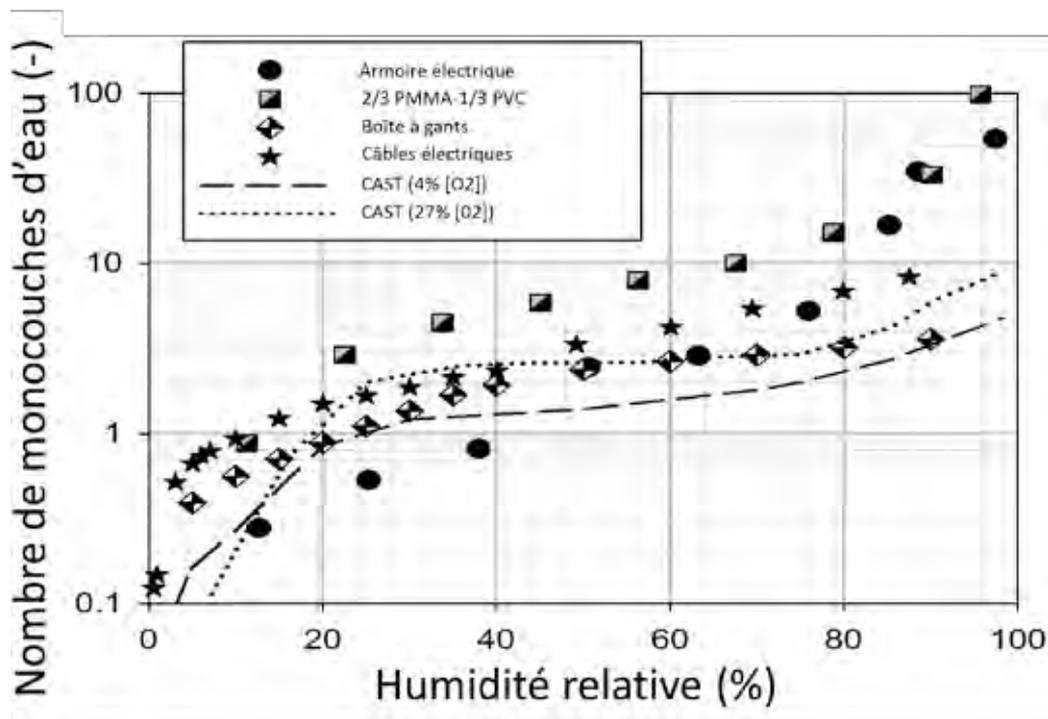


Figure 1. Isothermes de sorption réduites au nombre de monocouche(s) d'eau pour des suies de différents combustibles

Sujet de la thèse :

Développement d'outils d'aide au diagnostic et au pronostic en contexte d'accident nucléaire grave par apprentissage automatique de réseaux bayésiens

Doctorant : Thi Phuong Anh MAC
Date du début de la thèse : 04/01/2016
Laboratoire : PSN - RES/SAG/LETR
Financement de thèse : H2020 FASTNET
Directeur de thèse : Christophe GONZALES - UPMC
Tuteur de thèse : Karine CHEVALIER-JABET, Eric CHOJNACKI
Ecole doctorale : Paris VI - informatique, télécommunications et électronique ED 130

Dans le contexte de gestion de crise, il est indispensable de disposer d'outils d'aide au diagnostic et au pronostic des accidents nucléaires graves. Le projet européen FASTNET (Tool for the fast and reliable prediction of severe accident progression and anticipation of the source term of a nuclear accident), proposé par l'IRSN sur la base du retour d'expérience de l'accident de Fukushima, vise à développer un ensemble d'outils et de méthodes communs à ces deux tâches et implique des approches déterministes mais aussi, de manière plus exploratoire, probabilistes.

Ce travail de recherche s'intéresse aux méthodes probabilistes permettant de déterminer, à partir d'une liste d'observables, un scénario pouvant correspondre à la situation d'accident en cours de déroulement en lui associant un degré de crédibilité. Il se basera sur les réseaux bayésiens, une forme de représentation des connaissances issue de la théorie des graphes et de la théorie des probabilités. Un tel réseau est composé d'un graphe et des distributions de probabilités sous-jacentes : dans le cas d'une situation accidentelle, les nœuds du graphe représentent les variables physiques prises en compte et ses arcs, les liens entre elles.

La stratégie choisie pour ces méthodes est de ne pas produire un réseau bayésien *a priori* pouvant représenter un accident mais *d'apprendre* une structure de réseau à partir d'une base d'exemples de calculs générée avec ASTEC, le code de simulation d'accidents graves de l'IRSN. L'apprentissage automatique consiste ici à faire établir un résultat à la machine en lui présentant des exemples connus.

Un premier travail a permis de montrer la faisabilité de ce type d'approche en diagnostic d'accident nucléaire grave, malgré une grande difficulté d'application de l'état de l'art : les réseaux bayésiens n'étant pas conçus initialement pour la modélisation des systèmes physiques complexes, des adaptations ont été apportées aux algorithmes existants afin de traiter le mélange des variables discrètes et continues ainsi que l'existence de relations déterministes.

Si les résultats se sont montrés encourageants sur des calculs d'accidents très simples, il reste encore à les transposer sur des cas plus complexes. D'autres aspects de l'accident sont ensuite à prendre en compte, notamment son évolution temporelle, grâce à l'apprentissage de réseaux bayésiens dynamiques. Enfin, la mise en œuvre de l'inférence et de la validation/comparaison avec d'autres approches est importante afin d'aboutir à un ensemble complet de méthodes d'analyse.

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

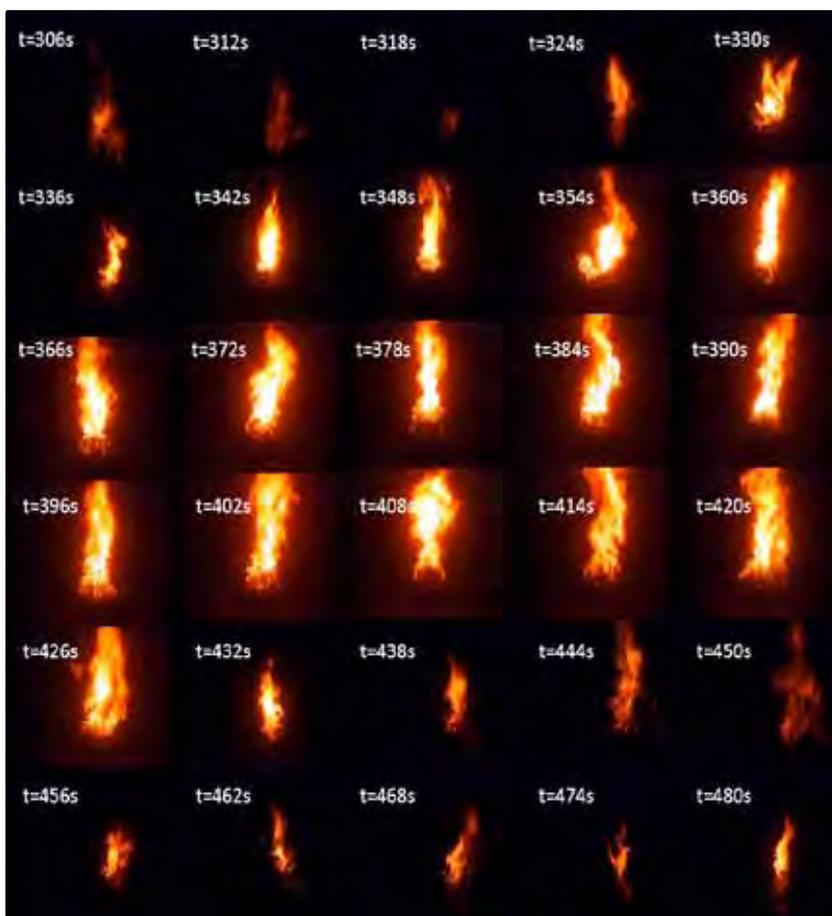
Doctorant :	Maxime MENSE
Date du début de la thèse :	05/10/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SA2I/LEF
Financement de thèse :	IRSN/région PACA
Directeur de thèse :	Bernard Porterie - Aix-Marseille Université, CNRS IUSTI UMR 7343
Tuteur de thèse :	Hugues Pretrel - IRSN ; Yannick Pizzo - IUSTI
Ecole doctorale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

Lors d'un incendie dans un milieu mécaniquement ventilé, la puissance de feu, généralement importante par rapport au débit nominal de ventilation des enceintes, conduit à des niveaux d'oxygénation inférieurs aux conditions environnementales rencontrées en atmosphère libre (21 %) en se rapprochant dans certains cas des limites inférieures d'inflammabilité (5-12%). Dans ces conditions, des modes instables de combustion sont rencontrés, comme cela été le cas récemment dans le dispositif de grand volume (120 m³) DIVA de l'IRSN. Ces instabilités se traduisent par des fluctuations basses fréquences importantes des grandeurs caractéristiques d'un incendie. Les applications de ce sujet concernent l'évaluation du risque incendie dans les installations nucléaires. Ces phénomènes oscillatoires peuvent avoir un impact direct sur la sûreté des installations nucléaires en entraînant notamment des pertes de confinement dynamique et d'intégrité des équipements de sectorisation. L'objectif de cette thèse est d'étudier théoriquement et expérimentalement les mécanismes conduisant à des instabilités de combustion de basse fréquence pour des scénarios d'incendie en milieux confinés et ventilés mécaniquement.

Ainsi, une première partie est consacrée à l'étude théorique. Il s'agit de définir analytiquement les couplages possibles permettant d'obtenir des solutions oscillantes et d'identifier les grandeurs (paramètres adimensionnels) caractérisant ces phénomènes instables. Les critères d'apparition des instabilités ainsi que les grandeurs les caractérisant (fréquence, amplitude) sont recherchés ainsi que les mécanismes physiques.

Ces travaux théoriques sont supportés par une approche expérimentale. Pour ce faire un dispositif expérimental à échelle réduite (1,9 m³), appelé NYX2, a été mis au point. Ce dernier permet de réaliser des feux en régime sous-oxygéné dans une enceinte fermée et mécaniquement ventilée. Le but de cette approche est de fournir des données de compréhension et de validation de l'approche théorique. Les paramètres d'étude sont la puissance du foyer, le type de combustible, le débit de ventilation, la position relative entre la bouche d'admission d'air et le foyer. La métrologie mise en place consiste à mesurer les champs de températures, la pression, la concentration des gaz, la perte de masse du combustible, les flux de chaleur. La structure et le déplacement de la flamme sera analysée grâce au traitement d'images vidéo.

Cette thèse est effectuée dans le cadre d'une collaboration entre l'IRSN et l'Université du Maryland, et plus particulièrement avec le professeur Arnaud Trouvé, pour son expertise dans le domaine des instabilités de combustion.



*Série d'images lors d'un cycle d'oscillations
(expérimentation PR2_VSP_S3 à grande échelle dans le dispositif DIVA)*

Sujet de la thèse :

Etude expérimentale du transfert paroi/fluide 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 :	LEMTA - PSN/SEMIA/LIMAR
Financement de thèse :	ANR PERFROI
Directeur de thèse :	Michel GRADECK, Alexandre LABERGUE
Tuteur de thèse :	Tony GLANTZ
Ecole doctorale :	Université de Lorraine/Energie, Mécanique, Matériaux

La présente thèse s'inscrit dans le cadre du projet PERFROI (Etude de la Perte de Refroidissement) piloté par l'IRSN ; ce projet s'inscrit dans le cadre des Programmes d'Investissements d'Avenir (PIA). Le projet, lancé en 2014, a pour but d'étudier la déformation thermomécanique et le refroidissement des crayons combustibles au sein d'un assemblage d'un cœur de réacteur nucléaire lors d'un Accident de Perte de Refroidissement Primaire (APRP). L'un des grands objectifs du projet PERFROI consiste à étudier la thermo-hydraulique au sein des zones bouchées d'un assemblage (suite à la déformation des crayons combustibles) pour mieux comprendre le refroidissement de ces zones.

Pour contribuer à l'étude thermo-hydraulique, la présente thèse a pour but la caractérisation expérimentale des écoulements diphasiques vapeur/gouttes avec transfert de chaleur au sein d'un canal représentatif d'une zone bouchée.

Afin de reproduire l'écoulement fluide caractéristique dans un sous canal partiellement bouché et les échanges parois/fluides s'y déroulant, ces zones seront modélisées par un tube Venturi vertical chauffé à haute température. Il sera composé de trois tronçons :

- Le premier tronçon sera de diamètre égal au diamètre hydraulique d'un sous canal de type REP ($D_h = 11.78$ mm).
- Le second tronçon sera représentatif d'une zone partiellement bouchée, le diamètre du tube étant compris alors entre 3.725 mm et 7.35 mm correspondant respectivement à un taux de bouchage de 90% et de 61%. Différentes longueurs de la section bouchée pourront être considérées (100 mm et 300 mm).
- Pour le dernier tronçon, le diamètre hydraulique augmentera progressivement afin de représenter la sortie de la zone bouchée puis se terminera par une partie cylindrique de même diamètre que celui du premier tronçon.

Afin de caractériser les échanges paroi/fluide à l'intérieur du tube, des techniques de métrologie optique thermique et fluide seront utilisées :

- Analyse par phase Doppler (PDA), pour déterminer la vitesse, la taille et la concentration des gouttes
- Fluorescence induite par laser (LIF), pour déterminer la température des gouttes
- Thermographie infrarouge, pour mesurer le champ de températures de la paroi du tube.

Ces dispositifs permettront d'avoir accès aux grandeurs physiques importantes pour ainsi établir des bilans globaux de transfert de chaleur et de masse afin de caractériser le refroidissement de l'écoulement diphasique en traversant une zone bouchée représentative.

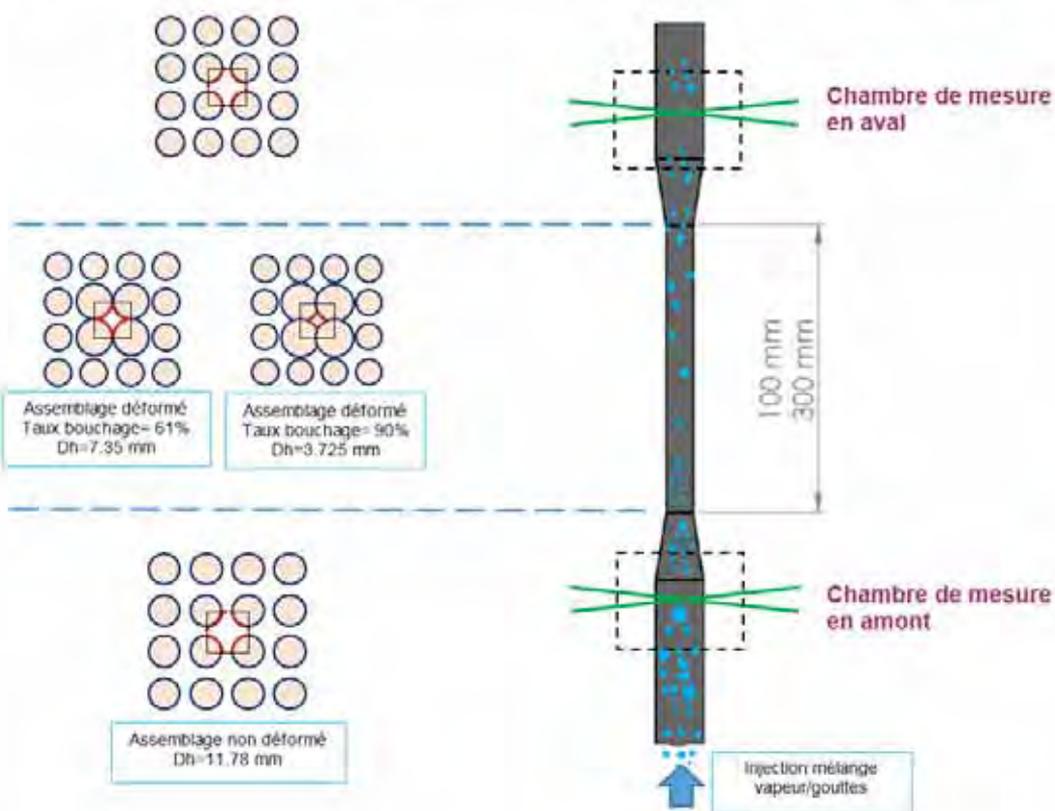


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental envisagé

Sujet de la thèse :**Structuration de l'expertise par une analyse mathématique décisionnelle :
application à la pollution maritime accidentelle**

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

Cette thèse s'inscrit dans le projet de recherche AMORAD, projet ANR post Fukushima dont un des objectifs est d'améliorer les outils de modélisation qui seraient sollicités dans le cas d'un accident en France. L'accident de Fukushima interroge au-delà des besoins de recherche propres à la connaissance des processus physiques à mener pour mieux modéliser le devenir des radionucléides dans l'environnement, sur leur utilisation en support à la gestion de crise. En effet, les modèles utilisés sont de plus en plus élaborés et exigeants en information et pour les 'alimenter' il faut recourir à différentes sources d'information de nature et de qualité variables.

Aussi, le travail de recherche proposé consiste à repérer et à analyser l'apport du formalisme mathématique comme support à l'expertise scientifique. Il s'agit de repérer les éléments de méta-connaissance auxquels recourent les analystes, les structurer sous forme de scénarios et modéliser les différentes formes d'incertitude, afin de mieux évaluer les évolutions possibles d'un accident et leur impact. Plus précisément, il s'agit d'identifier les facteurs influents et leurs incertitudes et d'établir un formalisme permettant d'en rendre compte en termes de conséquence pour une zone maritime ainsi que pour la population pélagique vivante dans cet environnement. Pour cela, on s'appuiera sur les développements récents en théorie de l'incertain et de l'analyse multicritère.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été faite, notamment sur la formulation du problème relatif à l'étude des conséquences, dans le cadre d'une problématique d'aide à la décision. Par exemple, le fait de classer une zone maritime dans un certain niveau de pollution présuppose l'établissement d'un panel de critères qu'il conviendra de synthétiser. En parallèle à cette analyse, un travail relatif à la pollution maritime (extraction des critères, identification des actions...) a été fait et a permis de représenter la détermination du niveau de contamination d'un poisson comme un processus de connaissance divisé en quatre blocs (cf. diagramme).

La prochaine étape consistera à construire une méthode permettant une représentation de la connaissance scientifique (ie modélisant les différentes formes d'incertitude) ainsi que des méthodes de fusion et d'agrégation d'information.

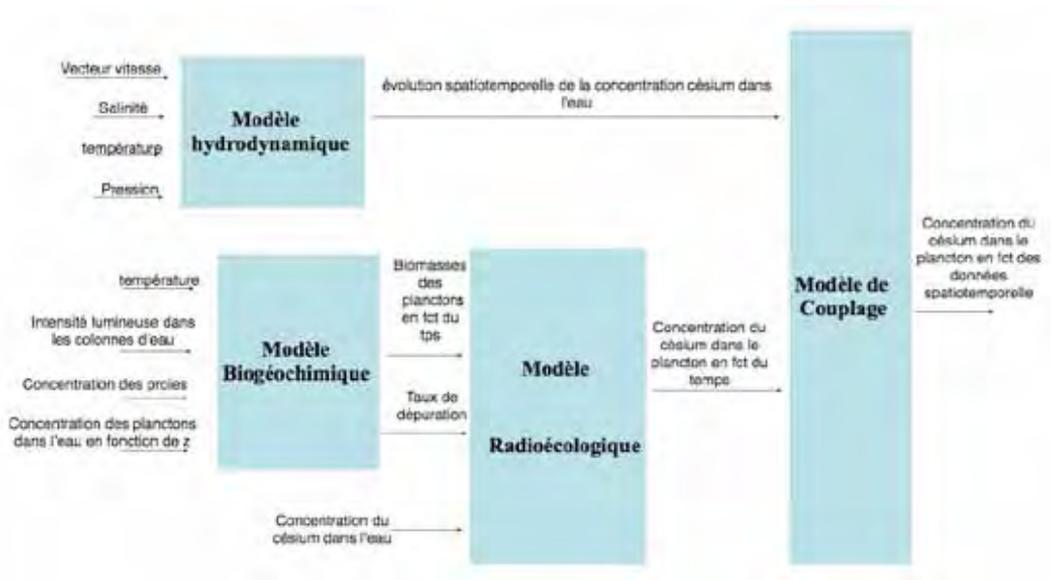


Diagramme de propagation du Cs dans la chaîne trophique

Sujet de la thèse :**Etude 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
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Pierre SGAUT, Laboratoire M2P2
Tuteur de thèse :	Fabien DUVAL
Ecole doctorale :	ED 353, Aix Marseille University

The study of turbulent flows evolving in a stable stratified place interests a large number of safety issues (both natural and industrial). In the framework of safety studies conducted by IRSN, an important issue concerns the risk of accumulation of hydrogen in the upper part of the nuclear containment mainly from the oxidation of the zircaloy alloy under the effect of buoyancy. The risk of explosion of this gaseous mixture can be reduced if the concentration levels of hydrogen are lowered under the effect of turbulent mixing. In this context, IRSN participates in the validation of CFD codes for the prediction of erosion of stratification by a turbulent jet. The results show that standard RANS first order turbulence models are insufficient in predicting the proper turbulent mixing of the stratification. Use of LES for such large scale experiments appears prohibitive. Hence, a hybrid RANS/LES approach is carried on.

In the present study a hybrid approach based on an explicit algebraic Reynolds stress model (EARSM) will be studied and implemented wherein an algebraic relation is provided for the Reynolds stress tensor by replacing the Boussinesq eddy viscosity hypothesis. This model integrates the robustness of a two-equation eddy-viscosity model and accounts for the turbulence anisotropy effects as well. When compared to the original RSM approach, the complications in anisotropy are limited by having an algebraic relationship. To take this forward, EARSM will be implemented in the P2REMICS code in a pure RANS context and validated on well-known academic cases. Following which the hybrid approach will be introduced through the Partially Integrated Transport Model (PITM) framework.

Amount of resolved turbulence in the transition and LES region is negligible. Hence simultaneously, a study on the forcing term within the momentum equation is done to increase the amount of resolved turbulence. As a first step, validation of the pre-implemented isotropic Random Fourier Model (RFM) with the available DNS data is done for the spatially developed channel case. Further, introducing anisotropy in the synthetic fluctuations generalizes this method. After which, it will be implemented to analyze the much relevant case in a hybrid context.

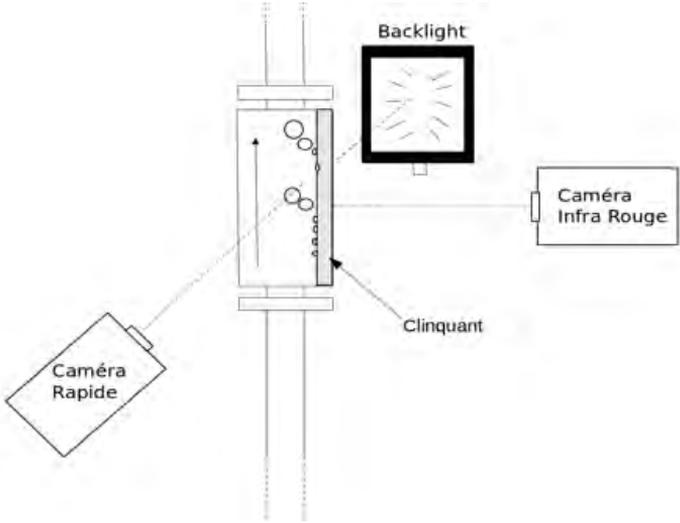
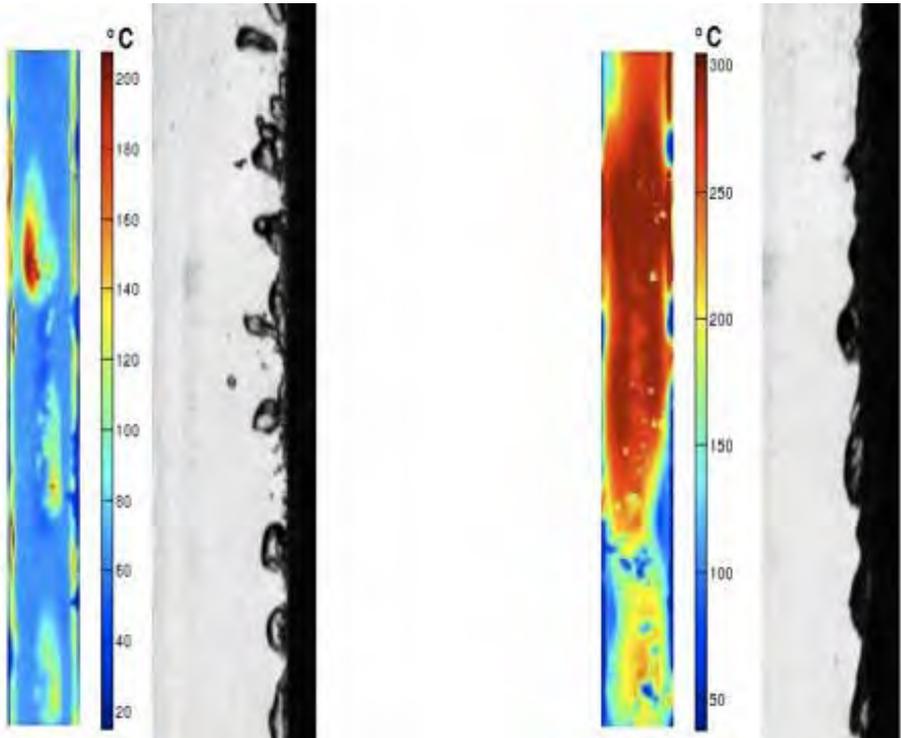
Sujet de la thèse :**Ebullition transitoire : modélisation du transfert de chaleur**

Doctorant :	Valentin SCHEIFF
Date du début de la thèse :	01/10/2015
Laboratoire :	PSN - RES/SEMIA/LIMAR
Financement de thèse :	Cofinancement EDF - IRSN
Directeur de thèse :	Catherine Colin, Julien Sebilleau - IMFT (Toulouse)
Tuteur de thèse :	Pierre Ruyer
Ecole doctorale :	Université de Toulouse - MEGEP ED 468

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. Par ailleurs le risque d'endommagement de la gaine du crayon est en grande partie lié à sa température. Quelques études en conditions réacteurs ont permis d'obtenir des courbes d'ébullition transitoires mais la modélisation qui en découle manque encore de fiabilité.

Pour étudier les transferts de chaleur dans les différents régimes d'ébullition transitoire, une expérience a été construite à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Cette étude expérimentale 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 (clinquant), est chauffée rapidement par effet Joule, simulant ainsi l'échauffement de la gaine du crayon suite au pic de puissance. La thermographie infra-rouge permet de mesurer la température directement à l'arrière du clinquant de manière précise. Une caméra rapide permet de visualiser les régimes d'ébullition. Un bilan thermique permet ensuite de calculer le flux de chaleur transmis au fluide et d'obtenir des courbes d'ébullition.

Les expériences réalisées jusqu'à présent se faisaient à puissance imposée. Aussi lorsque celle-ci était trop importante, l'augmentation de la température de paroi n'était pas contrôlée. Le flux critique était atteint conduisant à une transition vers l'ébullition en film et une augmentation rapide de la température de la paroi pouvant conduire à sa détérioration. Dans le but d'étudier plus en détails ce régime, un contrôle en température a été ajouté à l'expérience à l'aide d'un P.I.D (Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur). Les résultats obtenus en ébullition nucléée permettent de retrouver les résultats de la littérature tant pour le régime stationnaire que pour les cas transitoires (rampes de température de 1-50 K/s). Il apparaît que plus les rampes de températures sont importantes, plus les flux de chaleur sont élevés en ébullition nucléée. On envisage donc désormais d'étudier l'ébullition en film, pendant la chauffe ou le refroidissement de la paroi, avec différentes évolutions temporelles de la puissance injectée.



LISTE DES PARTICIPANTS ET INDEX DES PRÉSENTATIONS

Adrien ABBATE	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	28 - 29
Christelle ADAM-GUILLERMIN	PRP - ENV/SERIS/LECO	
Jocelyne AIGUEPERSE	IRSN/PRP - HOM	
David ALIBERT	IRSN/PSN - RES/SA2I/LEF	90 - 91
Youssef ALILOU	IRSN/PSN - RES/SCA/LECEV	36
Frederic ALONZO	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	
Sophie ANCELET	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LEPID	
Caroline ARCANJO	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	130 - 131
Marc BABUT	Laboratoire d'écotoxicologie - IRSTEA	
Pascal BAILLY - DU - BOIS	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRC	
Gauzelin BARBIER	IRSN/DSDP	
Nathalie BARDIN MONNIER	Laboratoire Réactions et Génie des Procédés Université de Lorraine	
Tiffany BEAUMONT	IRSN/PRP - HOM/SDI/LEDI	132 - 133
Mohamed BELERRAJOUL	IRSN/PSN - RES/SA2I/LIE	159
Nadia BENABDALLAH	IRSN/PRP - HOM/SDI/LEDI	14 - 15
Delphine BENAÏTREAU	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LR2I	
Nadia BENALLAL	IRSN/DSDP	
Ahmed BENTAIB	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR	
Lionel BICHET	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	72 - 73
Anthony BONFRATE	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	16 - 17
Jean-François BOTTOLLIER	IRSN/PRP - HOM	
Ségolène BOUET RIVOAL	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LEPID	134
Laurent BOUILLLOUX	IRSN/PSN - RES/SCA	
Philippe BOURACHOT	IRSN/PSN - RES/SA2I	
Thierry BOURGOIS	DSDP	
Patrick BOYER	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRTE	
David BROGGIO	IRSN/PRP - HOM/SDI/LEDI	
Alain BRUNISSO	IRSN/PSN - RES/SCA/LECEV	
Valérie BRUNO	IRSN/PRP - ENV/SESURE	
Laurent CANTREL	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Jérôme CARETTE	IRSN/PSN - EXP/SES/BEGC	
Roberto CARUSO	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR	160
Charlotte CAZALA	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LT2S	
Aryadeep CHAKRABORTY	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR	92
Alain CHAPEL	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LR2I	
Nabiha CHAUMEIX	Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement - CNRS Orleans	
Mohamed Amine CHERIF	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	46 - 47
Karine CHEVALIER - JABET	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Christophe CLEMENT	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	
Olivia COINDREAU	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC	
Juliette COLOMBANI	IRSN/PSN - RES/SEREX/L2EC	
Frédéric COPPIN	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	
Frédéric COUSIN	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Mickaël COUTIN	IRSN/PSN - RES/SA2I/LEF	
Valérie CREPEL	IRSN/DSDP	
Miriam D'AMICO	IRSN/PSN - RES/SA2I/LIE	95 - 96

Alexandre DAUZERES	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	
Anne DE VISMES	IRSN/PRP - ENV/STEME/LMRE	
Eric DELAUME	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	70 - 71
Aurélie DESBREE	IRSN/PRP - HOM/SDI/LEDI	
Céline DINOCOURT	IRSN/DSDP	
Isabelle DUBLINEAU	IRSN/PRP - HOM	
Cécile DUBOIS	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	98 - 99
Brigitte DUBOIS	IRSN/DSDP	
Roland DUCHER	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Loïc DUCROS	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LRTE	40 - 41
Eric DUMONTEIL	IRSN/PSN - EXP/SNC	
Yvan EB - LEVADOUX	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	103 - 104
Paul EYMEOD	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	161 - 162
Frederique EYROLLE	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LEREN	
Jad FARAH	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	
Thomas FERRACCI	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRTE	135 - 136
Laura FERRY	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	106 - 107
Valérie FEVRE NOLLET	Laboratoire PhysicoChimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère Université de Lille I	
Florian FICHOT	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC	
Camille FORTIN	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	163 - 164
Lucie FOURNIER	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LEPID	64
Sandrine FRELON	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	
Amelie FRENEAU	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LDB	137 - 138
Béatrice GAGNAIRE	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	
Kasi GAJAVALLI	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	165 - 166
Jean-Christophe GARIEL	IRSN/PRP - ENV	
Nicolas GARLAND	IRSN/PSN - EXP/SNC/LNC	76 - 77
Jacqueline GARNIER - LAPLACE	IRSN/PRP - ENV	
Didier GAY	IRSN/PRP - DGE	
Thomas GELAIN	IRSN/PSN - RES/SCA/LECEV	
Céline GELIS	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	
Laure GENIES	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	102
Mathilde GESTIN	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC	167 - 168
Rodolphe GILBIN	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	
Bruno GILLET	Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche	
Tony GLANTZ	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	
Marc GLEIZES	IRSN/PRP - ENV/STEME	
Richard GONZALEZ	IRSN/PSN - RES	
Ismail GOUMRI	IRSN/PSN - SRDS/SFOHREX/LSHS	169
Ange GOURBIL	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC	127 - 128
Anne-Cécile GREGOIRE	IRSN/PSN - RES/SEREX/L2EC	
Stéphane GRISON	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LRTOX	139 - 140
Romain GROSSEUVRES	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR	93 - 94
Sophie GROUSSET	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	87 - 88
Isabelle GUYOT	IRSN/DSDP	
Romain HANOZET	IRSN/PSN - RES/SA2I/LIE	170
Pascale HENNER	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	

Houssam HIJAZI	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	110 - 111
Sabine HOFFMANN.	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LEPID	65 - 66
Levent ISBILIROGLU	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	54 - 55
Jacques JABBOUR	IRSN/PSN - EXP/SES/BEGC	68 - 69
Ankita JADON	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	37
Cyprien JAILLET	IRSN/PRP - HOM/SRBE/L3R	61 - 60
Vaibhav JAISWAL	IRSN/PSN - EXP/SNC/LNR	171 - 172
Catherine JI YU	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	82 - 83
Louis JOÉSSEL	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	173 - 174
Jean-René JOURDAIN	IRSN/PRP - HOM	
Salima KAISSOUN	IRSN/PSN - RES/SCA/LEMAC	34 - 35
Jean-Claude LABORDE	IRSN/PSN - EXP	
Philippines LALAN	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	86
Patrick LALOI	IRSN/DSDP	
Maria LANCIERI	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	
Eric LASCAR	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LEREN	141 - 142
Olivier LAURENT	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LEPID	
Jérémy LAVIGNE	IRSN/PRP - HOM/SRBE/L3R	58 - 59
Dominique LE GULUDEC	IRSN	
Luiz LEAL	IRSN/PSN - EXP/SNC/LNR	
Dalila LEBSIR	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LRTOX	143 - 144
Cédric LECLERE	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	
Nathalie LEMAITRE	IRSN/DSDP	
Laura LINTIS	IRSN/PSN - RES/SCA/LPMA	175 - 176
Jean-Marc LOBACCARO	Unité Génétique, reproduction et développement Université de Clermont - Ferrand	
Thi Phuong Anh MAC	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	177
Michaël MANGEON	IRSN/PSN - SRDS/SFOHREX/LSHS	116 - 117
Olivier MARCHAND	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	
Sébastien MARMIN	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	78 - 79
Denis MARO	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRC	
Loïc MARTIN	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	25
Arnaud MARTIN - GARIN	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	
Olivier MASSON	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LEREN	
Duval Giancarle MBONGO DJIMBI	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Maxime MENSE	IRSN/PSN - RES/SA2I/LEF	178 - 179
Sylvain MEYLAN	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	12 - 13
Nicolas MEYNET	IRSN/PSN - RES/SAG/B2EGR	
Faoulat MIRADJI	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	123 - 124
Joachim MISS	IRSN/DSDP	
Agustín MOLINERO - GUERRA	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	84 - 85
Nathalie MONCOFFRE	CNRS - Institut de physique nucléaire de Lyon	
Céline MONSANGLANT - LOUVET	IRSN/PSN - RES/SCA/LPMA	
Charlène MOULIN	IRSN/PSN - RES/SCA/LPMA	112 - 113
Georges NAHAS	IRSN/PSN - EXP/SES/BEGC	
Huong Liên NGUYEN	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LT2S	44 - 45
Dorel OBADA	IRSN/PSN - RES/SEREX/L2EC	108 - 109
Pierre-Emmanuel OMS	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRC	145 - 146
Elif ORAL	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	50 - 51
Hugues PARADIS	IRSN/PRP - ENV/STEME/LMRE	20 - 21

Geoffrey PELLERIN	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRC	23 - 24
Juan David PENA CARRILLO	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	180 - 181
Frédéric PERALES	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	
Vincent PERRON	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	52 - 53
Laurent POURCELOT	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LEREN	
Corinne PREVOST	IRSN/PSN - RES/SCA/LEMAC	
Oussama RABOUN	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	182 - 183
Ashish RAJYAGURU	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	147
Adithya RAMANATHAN KRISHNAN	IRSN/PSN - RES/SA2I/LIE	184
Vincent REBOUR	IRSN/PRP - DGE/SCAN	
Hugo RENARD	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LRC	42 - 43
Jacques REPUSSARD	IRSN	
Alexandre RIBAULT	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LR2I	148 - 149
Fabienne RIBEIRO	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	
Laurent RICCIARDI	IRSN/PSN - RES/SCA	
Marine ROULIER	IRSN/PRP - ENV/SERIS/L2BT	150 - 151
Véronique ROUYER	IRSN/DSDP	
Laurence ROY	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LDB	
Pierre RUYER	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	
Jean-Christophe SABROUX	IRSN/PSN - RES/SCA	
Lola SARRASIN	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	31 - 32
Valentin SCHEIFF	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	185 - 186
Matthieu SCHULER	IRSN/DSDP	
Oona SCOTTI	IRSN/PRP - DGE/SCAN/BERSSIN	
Ahmedou SIDI	IRSN/PSN - RES/SEREX/L2EC	74 - 75
Caroline SIMONUCCI	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	
Irène SOROKINE - DURM	IRSN/DSDP	
Maamar SOUIDI	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LRTOX	
Frédéric SOYSOUVANH	IRSN/PRP - HOM/SRBE/L3R	152 - 153
Paul-Martin STEFFEN	Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit - Forschungszentrum Jülich	122
Lucie STETTEN	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LT2S	154
Ali SWAIDAN	IRSN/PSN - RES/SAG/LEPC	125 - 126
Karine TACK	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LRTOX	
Radia TAMARAT	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LR2I	
Benjamin TAMPON	IRSN/PRP - HOM/SDE/LMDN	155 - 156
Jackie TAV	IRSN/PRP - ENV/SESURE/LEREN	22
Sylvie THELLIER	IRSN/PSN - SRDS/SFOHREX/LSHS	118 - 119
Nicolas TKATCHENKO	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	157 - 158
Marie TRIJAU	IRSN/PRP - ENV/SERIS/LECO	100 - 101
François TROMPIER	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	
Benoît USUNIER	IRSN/PRP - HOM/SRBE/LR2I	62 - 63
Marie-Pierre VERAN - VIGUIE	IRSN/DRH	
Carmen VILLAGRASA	IRSN/PRP - HOM/SDE/LDRI	
Pierre-Guy VINCENT	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LPTM	
Thibaut VINCHON	IRSN/PRP - HOM/SDE/LMDN	
François VIROT	IRSN/PSN - RES/SAG/LETR	
Didier VOLA	IRSN/PSN - RES/SAG	
Charles WITTEBROODT	IRSN/PRP - DGE/SRTG/LETIS	
Yixian ZHOU	IRSN/PSN - RES/SEMIA/LIMAR	30

LISTE DES SERVICES ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS

PSN : Pôle Sûreté nucléaire

PSN - RES : Thématique *Recherche en sûreté*

PSN - RES/SEREX : Service d'Etude 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'Etudes et d'Expertises en accident Grave et Rejets radioactifs

LEPC : Laboratoire d'Etude de la Physique du Corium

LETR : Laboratoire d'Etude 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*

PSN - SRDS/SFOHREX : Service des Facteurs Organisationnels et Humains et du Retour d'Expérience

LSHS : Laboratoire de recherche en Sciences Humaines et Sociales

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'Etude et de SURveillance de la Radioactivité dans l'Environnement

LEREN : Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité dans l'environnement

PRP - ENV/STEME : Service de Traitement des Echantillons et de Métrologie pour l'Environnement

LMRE : Laboratoire de Mesure de 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'Etude et de recherche sur les Transferts et les Interactions dans les Sous-sols

LT2S : Laboratoire d'Etudes des Transferts en Sub-Surface

PRP - DGE/SCAN : Service de Caractérisation des sites et des Aléas Naturels

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).



IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Siège social

31, avenue de la Division Leclerc
92260 - Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre 546 018

Site internet

www.irsn.fr

Référence : DSDP/SPS 2016-00046