

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

DU 31 MARS AU 02 AVRIL

# Journées des thèses 2014

PARIS



Direction de la stratégie, du développement et des partenariats

# **Journées des thèses IRSN 2014**

**Paris, 31 mars - 2 avril 2014**





## PROGRAMME

**Lundi 31 mars 2014**

### **Accueil dès 8h30**

*Président de session : T. BOURGOIS*

***salle Le Loft***

### **9h Session plénière Sûreté « Réacteurs du futur et facteurs humains »**

A. RONDEAU Étude de la mise en suspension aéraulique appliquée à la problématique des poussières dans le futur réacteur ITER

S. CARMINATI Impacts des nouvelles technologies sur les activités en radiothérapie et sur la sécurité des patients

J. EYDIEUX Prendre en compte la sécurité gérée dans les évaluations de sûreté : le cas des activités de manutention

E. MATHE Comportement des radiocontaminants dans le ciel de pile et l'enceinte de confinement d'un RNR refroidi au sodium en situation accidentelle : partition de radioéléments

### **10h40 Pause**

*Président de session : P. LALOI*

***salle Le Loft***

### **11h10 Session plénière Radioprotection**

E. RANNOU Étude de l'implication du compartiment vasculaire dans l'initiation et la progression des lésions intestinales radio-induites : conséquences de l'inactivation temporelle de PAI-1 spécifiquement dans l'endothélium sur les fonctions physiologiques associées aux dommages radio-induits aux tissus sains

N. JOURNY Analyse de la relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants lors d'exams tomographiques et la survenue de pathologies tumorales au sein de la cohorte « enfants scanner »

S. BAGHADI Analyse des actinides dans les urines par couplage entre les colonnes calixarène et la spectrométrie de masse à plasma inductif

### **12h25 Déjeuner**



## 14h Sessions parallèles

### Sûreté

#### « Accidents graves »

*Président de session : G. HACHE*

#### **salle Le Loft**

- A. DECRETON Détermination expérimentale et modélisation thermodynamique du système Ag-Zr-In
- R. CLAVIER Etude expérimentale et modélisation des pertes de pression lors du renoyage d'un lit de débris
- S. CASTRILLON ESCOBAR Instabilités et dispersion des jets de corium liquides : analyse des processus physiques et modélisation dans le logiciel mc3d
- A. MABROUK Développement d'outils d'aide au diagnostic en contexte incertain : application aux diagnostics de situations accidentelles

### Radioprotection

#### « Etude des effets biologiques des rayonnements ionisants »

*Président de session : F. PAQUET*

#### **salle Le Forum**

- E. MINTET Changements phénotypiques des cellules endothéliales irradiées : implication de la transition endothélium-mésenchyme dans le développement des complications des radiothérapies
- A. VAURIJOUX Etude des modifications génétiques et épigénétiques suite à une exposition aux rayonnements ionisants : lien entre dépôt d'énergie et devenir cellulaire
- K. GOMBEAU Études des effets épigénétiques de l'uranium ou d'une irradiation gamma sur le cerveau et les gonades du poisson zèbre : caractérisation de biomarqueurs
- F. PARISOT Etude mécaniste de la toxicité des radiations ionisantes chez Daphnia Magna

## 15h20 Pause

*Président de session : D. BOULAUD*

#### **salle Le Loft**

### 15h50 Session plénière Radioécologie

Conférencier invité : Pascal BAILLY DUBOIS

- M. BELHARET Modélisation numérique de la dispersion en mer des radionucléides rejetés lors de l'accident de la centrale de Fukushima et transfert au milieu biologique
- M SY Quantification des incertitudes sur la simulation des transferts dans l'environnement terrestre de radionucléides émis lors d'un accident et l'évaluation de l'exposition des populations humaines par voie alimentaire
- A. CUVIER Accumulations de l'uranium, de ses descendants et des éléments trace métalliques dans les sols de zones humides autour des anciens sites miniers
- C. DUFRESNES Compréhension et analyse des processus hydrosédimentaires dans la baie de Toulon. Apport à la modélisation de la dispersion des radionucléides

## 17h30 Clôture de la journée par le Directeur général



## **Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

*Président de session : J. GARNIER-LAPLACE*

***salle Le Loft***

### **9h Session plénière Radioprotection « Radiotoxicologie »**

A. BUISSET-GOUSSEN Études des effets chroniques des rayonnements ionisants chez un organisme modèle, *Caenorhabditis elegans* : du moléculaire à la dynamique des populations, via le développement d'un modèle bioénergétique

C. LE GALLIC Influence d'une contamination chronique par ingestion de césium 137 sur la progression de la pathologie athéromateuse

D. DRUBAY Analyse de la relation dose-réponse aux faibles doses et faibles débits de dose pour les risques de mortalité par cancer et par maladie cardiovasculaire chez les mineurs d'uranium

**10h15 Pause**

*Président de session : R. GONZALEZ*

***salle Le Loft***

### **10h45 Session plénière Sûreté « Confinement »**

S. DELCOUR Étude des mécanismes physico-chimiques de mise en suspension de contaminants particuliers lors de la dégradation thermique de matériaux représentatifs des installations nucléaires

P. MARCHAL Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation

S. BOURROUS Étude du colmatage de filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

Z. MANA Étude de la suspension de particules à l'intérieur d'un local sous l'effet de la marche d'un opérateur

**12h15 Déjeuner**



## 13h45 Sessions parallèles

### Sûreté

*Président de session : B. CHAUMONT*

#### **salle Le Loft**

J.GOULIER Comportements aux limites de flammes de prémélange hydrogène/air/diluants. Étude de la transition flamme laminaire-flamme turbulente

J. TRINCAL Modélisation du comportement de l'iode dans l'atmosphère

T. LE DEZ Approche par similitude du couplage des effets thermiques et du vent sur les transferts de masse dans les réseaux aérauliques des bâtiments complexes

G. FERRAN Méthodes avancées pour le traitement des données nucléaires

### Radioprotection « Radiotoxicologie »

*Président de session : F. PAQUET*

#### **salle Le Forum**

S ZHIVIN Etude épidémiologique des travailleurs du cycle du combustible nucléaire et analyse des effets sanitaires des composés uranifères en fonction de leur solubilité

M. LEGRAND Une contamination interne chronique à l'uranium modifie-t-elle le processus de la neurogenèse au cours du développement et à l'âge adulte chez le rat ?

A. LE GUERNIC Impact de la contamination pluri-métallique à tendance uranifère sur le milieu aquatique et conséquences sur les réponses immunitaires et les capacités adaptatives du poisson

S. MUSILLI Étude des mécanismes d'action du Strontium 90 sur le système immunitaire à la suite d'une contamination chronique

## 15h15 Pause

*Président de session : B. CHAUMONT*

#### **salle Le Loft**

**15h45** Conférencier invité : Laurent CANTREL

### **16h15 Session plénière Sûreté « Matériaux »**

N. BAUDIN Évaluation du transfert de chaleur en ébullition en film transitoire.

### **16H40 Session plénière Sûreté « Incendie »**

K. VARRAL Étude de l'écoulement de convection mixte d'un gaz à densité variable à travers une ouverture horizontale reliant deux compartiments superposés et mécaniquement ventilés - Application à la propagation verticale des fumées d'incendie dans des configurations multi-locaux.

A. KACEM Modélisation numérique de la pyrolyse en atmosphère normalement oxygénée et sous-oxygénée



## **Mercredi 2 avril 2014**

*Président de session : G. NAHAS*

***salle Le Loft***

### **9h Session plénière Sûreté « Incendie »**

D. BOUFLERS Étude des mécanismes de formation des précurseurs de suies dans des flammes de méthane pré-mélangées dopées à différentes richesses

### **9h25 Session plénière Sûreté « Matériaux »**

A HILAIRE Étude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune au long terme. Application aux enceintes de confinement.

L. AMARSID Fragmentation et écoulement des agrégats poreux

**10h15 Pause**

*Président de session : F. QUEINNEC*

***salle Le Loft***

**10h45** Conférencier invité : Eric BLANCHARDON

### **11h15 Session plénière Radioprotection « Dosimétrie »**

A. MOIGNIER Dosimétrie cardiaque à l'aide de fantômes numériques hybrides dans le cadre de traitements par radiothérapie

C. MOIGNIER Dosimétrie des faisceaux de photons de petites dimensions utilisés en radiothérapie stéréotaxiques : détermination des données dosimétriques de base et évaluation des TPS

A. PETITGUILLAUME De la dosimétrie standard à la dosimétrie personnalisée en médecine nucléaire : prise en compte de la morphologie et de la biocinétique spécifique au patient

**12h30 Déjeuner**



## 14h Sessions parallèles

### Radioprotection « Métrologie »

*Président de session : M. GLEIZES*

#### **salle Le Loft**

A. HABIBI-ZATER Analyse de radioéléments en situation post-accidentelle. Détermination d'émetteurs alpha par couplage chromatographie liquide / ICP-MS

A. BOUAROURI Développement d'un système de mesure à 10 Hz de concentration d'aérosol atmosphérique

D. MAIRE Développement d'une chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée pour les références en énergie et en fluence des champs neutroniques de basses énergies

B. SABOT Étalonnage des instruments de mesure de l'activité volumique du thoron dans l'air

### Sûreté « Combustible »

*Président de session : G. HACHE*

#### **salle Le Forum**

J ARAYRO Comportement de gaz rares confinés dans une matrice céramique à haute température : modélisation par des approches semi-empiriques

T. MADANI Identification expérimentale de modèles thermo-mécaniques de zones cohésives pour des sollicitations complexes

X. HALLER Comportement des matériaux nanoporeux : application au combustible UO<sub>2</sub>

E. TORRES Étude de la diffusion de l'hydrogène dans les alliages de zirconium des gaines de combustibles nucléaires et son interaction avec le chargement mécanique.

## 15h35 Pause

*Président de session : D. GAY*

#### **salle Le Loft**

### 16h10 Session plénière Géosphère

I FATNASSI Diffusion de radionucléides en conditions physico-chimiques hors équilibre au travers de roches argileuses indurées : expérimentation versus simulation

C de la TAILLE Évaluation de l'activité sismique quaternaire des failles du Jura méridional

E. VI NHU BA Détection des failles et des zones de fracturation dans les calcaires supérieurs et les argilites de la station expérimentale de Tournemire par combinaison d'imagerie sismique Très Haute Résolution et de résistivité électrique

## Clôture des Journées des thèses



## **Lundi 31 mars 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : T. BOURGOIS*

#### **9h Session plénière Sûreté « Réacteurs du futur et facteurs humains »**

A. RONDEAU Étude de la mise en suspension aéraulique appliquée à la problématique des poussières dans le futur réacteur ITER

S. CARMINATI Impacts des nouvelles technologies sur les activités en radiothérapie et sur la sécurité des patients

J. EYDIEUX Prendre en compte la sécurité gérée dans les évaluations de sûreté : le cas des activités de manutention

E. MATHE Comportement des radiocontaminants dans le ciel de pile et l'enceinte de confinement d'un RNR refroidi au sodium en situation accidentelle : partition de radioéléments



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Etude de la mise en suspension aéroulique appliquée à la problématique des poussières dans le futur réacteur ITER.

<b>Doctorant :</b>	<b>Anthony Rondeau</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>12/12/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LPMA</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Eric Chassefière – Université Paris Sud</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Jean-Christophe Sabroux</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>MIPEGE – ED 534</b>

---

Durant le fonctionnement opérationnel du futur tokamak *ITER* (réacteur de fusion thermonucléaire), une importante quantité de poussières, provenant de l'érosion des parois internes du tore par le plasma, est attendue dans sa chambre à vide ( $1500 \text{ m}^3$ ). Pour des impératifs de sûreté, il est indispensable de quantifier la fraction de particules qui sera potentiellement mise en suspension lors d'un éventuel accident de perte de vide (*LOVA: Loss Of Vacuum Accident*), sachant que l'inventaire maximum est d'une tonne de poussières.

Nous avons réalisé une analyse des particules spécifiques à un tokamak *via* une collecte particulière dans le tokamak allemand *AUG (ASDEX Upgrade: Axially Symmetric Divertor EXperiment)*. L'intérêt de ce tokamak est qu'il présente un matériau face au plasma identique à celui qui est prévu pour le divertor d'*ITER* : à savoir du tungstène. De plus, malgré le fait qu'*AUG* soit beaucoup plus petit qu'*ITER* ( $45 \text{ m}^3$  vs.  $1400 \text{ m}^3$ ), sa géométrie est quasi-similaire à ce dernier. Les particules ont été collectées à l'aide d'un appareil appelé « *Duster Box* » utilisant le mécanisme de mise en suspension aéroulique. La caractérisation a été effectuée avec un microscope optique couplé à un système d'acquisition d'images, suivi d'un traitement d'images numériques. Le résultat obtenu est une distribution bimodale : un mode à  $0,7 \mu\text{m}$  composé de particules « floconneuses » et un mode à  $1,9 \mu\text{m}$  composé de particules sphériques (Figure 1). La caractérisation de particules de tungstène représentatives de celles attendues dans *ITER* et potentiellement mobilisables par un écoulement d'air constitue une première. Ainsi, une voie s'ouvre vers une meilleur analyse des conséquences d'un *LOVA*.

Nous avons aussi réalisé des expériences de mise en suspension de particules dans la soufflerie de l'*ESA (European Space Agency)* et de l'Université d'Aarhus au Danemark (Figure 2). Nous avons notamment observé que l'épaisseur du dépôt exerce une forte influence sur le coefficient de remise en suspension, du fait de la mobilisation des particules « par paquets ». Enfin, nous disposons désormais des premières données expérimentales permettant de tester un modèle de calcul (*DUST*) intégrant l'effet de la basse pression dans le mécanisme de mobilisation.

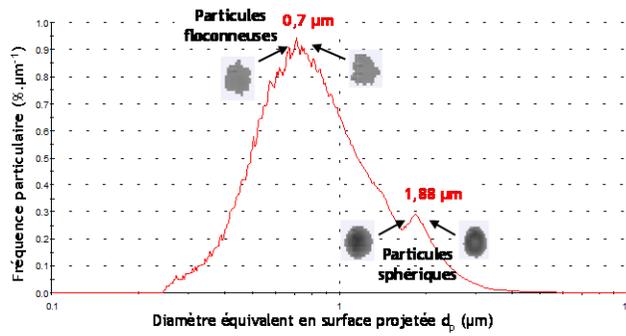


Figure 2 : photographie de la soufflerie de l'ESA et de l'Université d'Aarhus au Danemark



---

## **Impact des nouvelles technologies et techniques sur l'activité des soignants et la sécurité des soins en radiothérapie.**

<b>Doctorant :</b>	<b>Sarah Carminati</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN/SRDS/LSHS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Françoise Decortis – Université Paris 8 (Laboratoire Paragraphe)</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Hélène Faye</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris 8 /Cognition Langage Interaction</b>

---

Chaque année en France, 200 000 personnes sont traitées par radiothérapie externe. Dans ce domaine, les évolutions technologiques sont constantes depuis une dizaine d'années, notamment pour accroître la précision des traitements. Ces changements permettent aux personnels d'enrichir leurs compétences. Toutefois, cette dynamique introduit des modifications des pratiques de travail constituant un facteur de risques pour la sécurité des soins.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'appropriation d'un changement technologique par les manipulateurs d'électroradiologie qui constituent la dernière barrière de sécurité avant la délivrance effective du traitement. Comment évolue leur activité individuelle et collective (les stratégies, les contraintes, le partage des tâches) ? Comment évolue l'usage des outils dans le temps ? Est-ce que l'introduction d'une nouvelle technologie impacte la relation soignant-soigné ?

Notre démarche est composée de deux étapes. La première est d'analyser l'activité des manipulateurs avant le changement technologique. La seconde consiste à suivre l'évolution des pratiques pendant et suite au changement technologique. Nous vous exposons les principaux résultats de la première étape.

Nos résultats issus d'observations et d'entretiens montrent que les manipulateurs d'électroradiologie ont établi des stratégies pour « gagner du temps » afin de répondre aux exigences des tâches prescrites et aux fortes contraintes temporelles. Ces stratégies permettent d'élaborer des marges de manœuvre pour « soigner le patient » (délivrer le traitement) tout en préservant la santé des opérateurs et atteindre la productivité attendue par la hiérarchie. Ainsi, les opérateurs doivent réaliser une diversité de compromis pour effectuer leur activité. Ces stratégies s'observent sur les plans collectif, relationnel, technique et organisationnel. Nous relevons une adaptation des règles d'utilisation de l'outil de traitement, une restructuration du collectif mais également des re-élaborations des exigences réglementaires. D'autre part, les manipulateurs d'électroradiologie privilégient le « soin » (délivrer la dose de traitement) au « prendre soin » (communiquer avec les patients).

La suite de notre recherche consistera à observer in situ, l'évolution de ces dimensions de l'activité avec le changement technologique. Pour ce faire deux angles d'analyse seront privilégiés : l'analyse de l'évolution des conflits de buts dans l'activité et l'analyse de l'évolution de l'instrumentation du

collectif. Nous envisageons à long terme, une comparaison du processus d'appropriation d'une même technologie sur deux terrains différents.



*Illustration de l'activité de « Positionnement du patient » par les manipulateurs d'électroradiologie en radiothérapie*

---

## **Prendre en compte la sécurité gérée dans les démonstrations de sûreté : le cas des activités de manutention**

<b>Doctorant :</b>	<b>Jérémy Eydieux</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>DIR/SER/LAB</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Chaire RESOH École des Mines de Nantes</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Benoît Journée – Université de Nantes</b>
<b>Co-encadrante :</b>	<b>Stéphanie Tillement – École des Mines de Nantes</b>
<b>Tuteurs de thèse :</b>	<b>Hélène Faye &amp; François Jeffroy</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de Nantes/DEGEST</b>

---

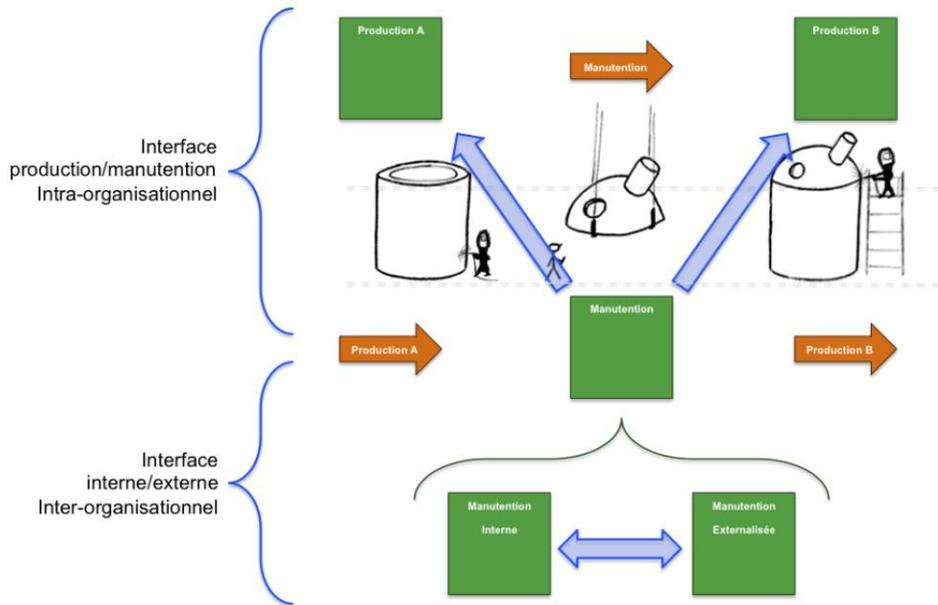
Notre projet de recherche vise à analyser l'intégration de la « sécurité gérée » dans le cadre des démonstrations de sûreté. La sécurité gérée est définie par Daniellou et coll. (2009) comme la « capacité d'anticiper, de percevoir et de répondre aux défaillances imprévues par l'organisation ». Elle se définit en opposition à la sécurité réglée, la capacité du système à « éviter toutes les défaillances prévisibles par des formalismes, règles [...] et par un management assurant le respect des règles ». Selon la théorie, la sûreté est produite grâce à une articulation de ces deux formes de sécurité.

La prise en compte de la sécurité gérée dans le processus de gouvernance des risques nucléaire pose problème, en particulier dans le cadre des démonstrations de sûreté qui sont principalement orientées vers la sécurité réglée. Celles-ci doivent être produites par les exploitants et évaluées par l'IRSN et l'ASN selon des modalités précises établies par un ensemble de textes réglementaires (Rolina, 2008). Nous explorerons les relations entre ces différentes institutions afin de comprendre ce que l'intégration de la sécurité gérée soulève comme problème.

Les activités de manutention sont globalement sous-procéduralisées. Leur intégration dans les dispositifs de gestion nécessite la prise en compte de la partie « gérée » de l'activité. Il paraît dès lors pertinent de s'intéresser à la manière dont les exploitants produisent des démonstrations impliquant les activités de manutention, et comment l'IRSN et l'ASN les évaluent. En procédant par de l'observation située de l'activité (Journée, 2012), nous explorons au préalable la part formelle et informelle de la manutention. Nous nous intéresserons ensuite à l'activité de démonstration dans le cadre du projet de démantèlement d'une INB.

Notre travail a pour l'instant permis de mieux appréhender ce qui constitue le « réglé » et le « géré » des activités de manutention. La thèse se recentre désormais sur la prise en compte du géré dans l'activité d'écriture et l'activité de lecture des textes de démonstration. Nous présenterons des éléments d'analyse des activités de manutention, en particulier sur la prise en compte de leur part de « géré ».

## Mobilisation du géré aux interfaces





---

## Comportement des radiocontaminants dans le ciel de pile et l'enceinte de confinement d'un RNR refroidi au sodium en situation accidentelle

<b>Doctorant :</b>	<b>Emmanuel MATHE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>10/08/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SAG/LETR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>AREVA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Denis PETITPREZ - PC2A</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Martin KISSANE</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Lille 1/sciences et technologie</b>

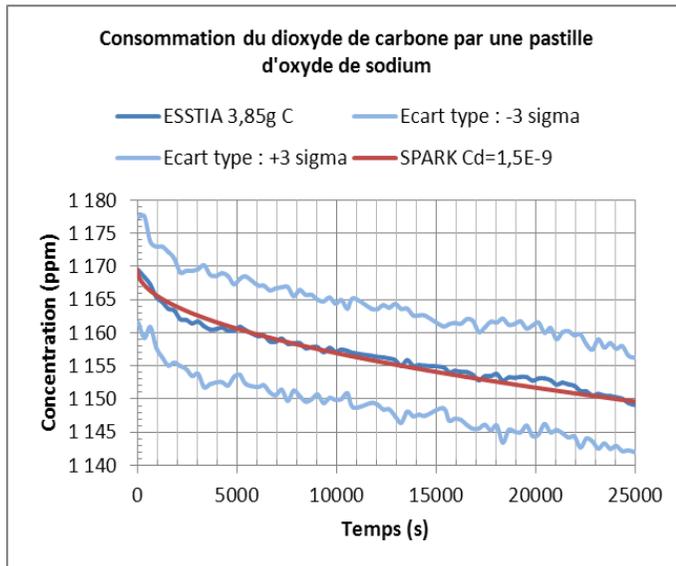
---

Le réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na) est de nouveau étudié en France notamment afin de répondre aux besoins de production d'énergie électrique à grande échelle et à long terme. Réétudier la sûreté des RNR-Na et estimer les conséquences d'un accident grave sont donc nécessaires. Une épreuve majeure pour la sûreté comprend une fuite importante de sodium dans l'enceinte de confinement où le sodium s'oxyderait et s'enflammerait produisant des quantités copieuses d'aérosols d'oxyde.

Au-delà des conséquences de surpression et de température, il est important d'analyser l'évolution physico-chimique de ces aérosols afin de suivre leur toxicité. De plus, cette analyse est une étape incontournable de l'analyse du terme source. L'évolution des aérosols n'ayant été que très peu étudiée, une modélisation crédible doit être proposée.

Après analyse de la littérature, le modèle de Cooper (1980) s'avère être le plus abouti. Cooper a modélisé l'évolution des aérosols en différentes couches d'oxyde, d'hydroxyde et de carbonates en fonction du temps et de l'atmosphère ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ). Ce modèle s'appuie sur un modèle théorique du coefficient de diffusion des gaz à travers les couches solides de l'aérosol ; ce coefficient dépend de deux paramètres ajustés sur quelques données expérimentales (modèle non validé).

Dans ce travail, des améliorations de modélisation ont été apportées (modélisation SPARK) ; néanmoins, pour obtenir davantage de données, une expérience a été conçue (expérience ESSTIA) qui consiste à mesurer la consommation et la production des gaz réagissant avec une pastille de peroxyde de sodium. Les résultats générés ont permis de mieux comprendre la phénoménologie complexe des transformations physico-chimiques de ces aérosols et de réaliser et valider un modèle plus fiable que l'unique modèle de Cooper.





## **Lundi 31 mars 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : P. LALOI*

#### **11h10 Session plénière Radioprotection**

E. RANNOU Étude de l'implication du compartiment vasculaire dans l'initiation et la progression des lésions intestinales radio-induites : conséquences de l'inactivation temporelle de PAI-1 spécifiquement dans l'endothélium sur les fonctions physiologiques associées aux dommages radio-induits aux tissus sains

N. JOURNY Analyse de la relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants lors d'examens tomodensitométriques et la survenue de pathologies tumorales au sein de la cohorte « enfants scanner »

S. BAGHADI Analyse des actinides dans les urines par couplage entre les colonnes calixarène et la spectrométrie de masse à plasma inductif



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Conséquences de l'inactivation conditionnelle de PAI-1 dans l'endothélium sur les fonctions physiopathologiques associées aux complications des radiothérapies

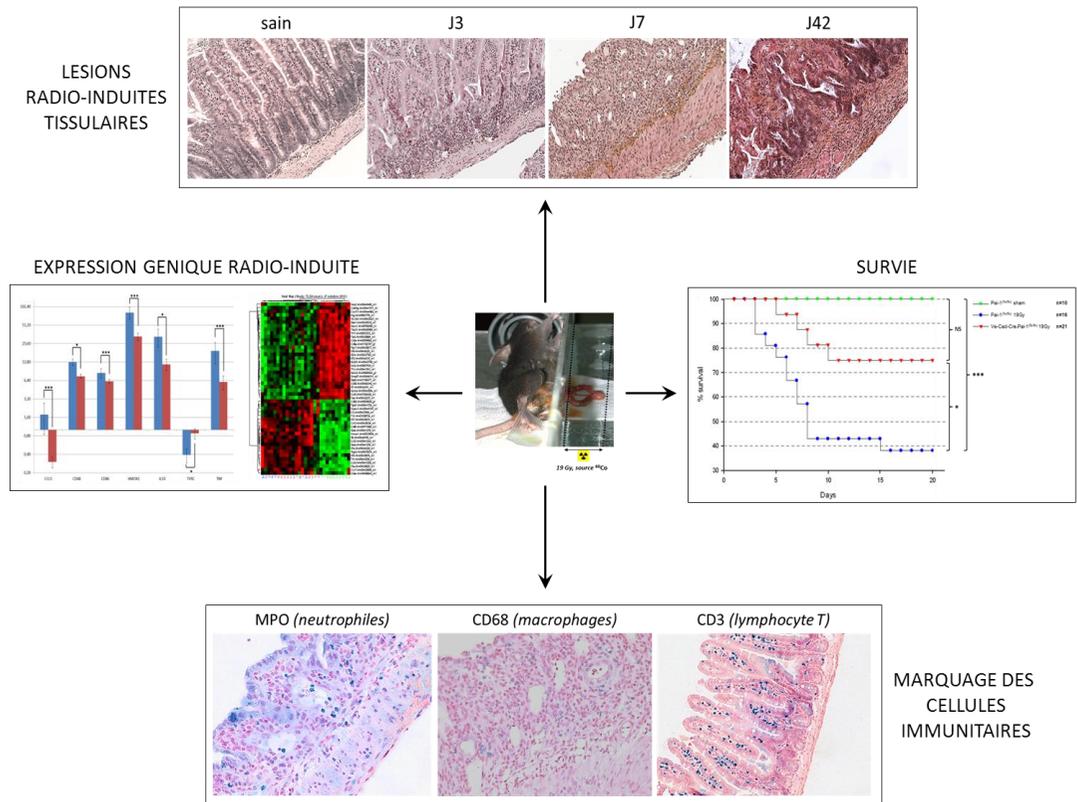
<b>Doctorant :</b>	<b>Emilie Rannou</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SRBE/L3R</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/EDF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Christophe Sabourin – CHU Rouen</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Fabien Milliat</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPMC/ED394</b>

---

La radiothérapie est à ce jour un outil indispensable des traitements anticancéreux. Cependant, l'efficacité des rayonnements ionisants dans le traitement des cancers abdomino-pelviens est associée à l'apparition de lésions radio-induites aux tissus sains présents dans le champ d'irradiation. Il est admis que la réponse de l'intestin aux rayons ionisants est intégrée, et résulte de l'implication de l'ensemble des compartiments qui le compose. Parmi ces compartiments, l'endothélium vasculaire est décrit comme une composante déterminante du développement des dommages radio-induits, bien qu'aucune étude ne le relie strictement à la progression des lésions tissulaires radio-induites. Dans ce contexte, il a été démontré au laboratoire que PAI-1 (Plasminogen Activator Inhibitor type-1), qui est principalement sécrétée par l'endothélium, est une protéine clé impliquée dans le développement et la chronicité des lésions intestinales radio-induites. Cette protéine pourrait donc établir un lien direct entre la dysfonction de l'endothélium et la progression des dommages radio-induits.

L'objectif de ce travail de thèse est donc d'étudier le rôle du pool endothélial de PAI-1 dans l'initiation et la progression des lésions intestinales radio-induites. Cette question est abordée par l'utilisation de souris déficientes pour PAI-1 spécifiquement et exclusivement dans l'endothélium (PAI-1 KO<sup>endo</sup>) dans un modèle d'irradiation localisée de l'intestin grêle.

Nous avons ainsi pu mettre en évidence une amélioration de la survie, ainsi qu'une diminution de la sévérité des lésions radio-induites tardives après irradiation chez les souris PAI-1 KO<sup>endo</sup>. De plus, des différences dans l'expression radio-induite de certains gènes liés à la mort cellulaire et au recrutement des cellules immunitaires ont été démontrées chez ces mêmes souris au niveau de l'intestin, et ce à différents temps post-irradiation. Ce dernier point a par ailleurs été confirmé par le marquage immunohistochimique des cellules immunitaires dans les tissus intestinaux irradiés. L'ensemble de ces résultats démontre que le pool endothélial de PAI-1 joue un rôle important dans l'initiation et la progression des lésions intestinales radio-induites. De plus, ces travaux impliquent pour la première fois un lien de causalité direct entre la réponse de l'endothélium à l'irradiation, et les effets tissulaires radio-induits qui en résultent.



---

## **Analyse de la relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants lors d'examens tomodensitométriques et la survenue de pathologies tumorales au sein de la cohorte « enfants scanner »**

<b>Doctorant :</b>	<b>Neige JOURNY</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/11/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SRBE/LEPID</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>(FP7/2007-2013)</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Dominique LAURIER IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Marie-Odile BERNIER IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Sud – ED420 Santé Publique</b>

---

Les interrogations sur les risques potentiels de cancer radio-induit associés à la radiologie diagnostique s'accroissent à mesure de l'augmentation de la fréquence de recours aux examens, en particulier pour les jeunes enfants que l'on sait être particulièrement radiosensibles. Bien qu'ils ne représentent que 10% des examens, les scanners contribuent pour 60% de la dose collective liée à la radiologie diagnostique. Des études épidémiologiques récentes suggèrent une augmentation du risque de cancer parmi des populations exposées aux scanners. L'interprétation de ces résultats est cependant difficile compte tenu du manque d'information sur l'indication des examens.

L'étude Enfant Scanner mise en place à l'IRSN a pour objectif de caractériser le risque de cancer parmi des enfants ayant reçu des examens scanner avant 10 ans dans 23 services de radiologie en France. Les doses cumulées aux organes sont estimées à partir des paramètres des protocoles radiologiques et à l'aide d'un logiciel de calcul dédié (NCICT v1.0) intégrant des fantômes pédiatriques réalistes. Le suivi d'incidence et de mortalité est réalisé grâce aux registres nationaux. Les diagnostics enregistrés dans les bases administratives hospitalières sont utilisés pour identifier les enfants ayant certains syndromes génétiques ou d'autres pathologies associés à une augmentation du risque de cancer et susceptibles de motiver le recours aux examens.

Parmi 67000 enfants suivis entre 2000 et 2011, nous estimons ainsi des excès de risque relatifs de leucémies et de lymphomes de 0.047 (95%CI -0.065 ; 0.159) et 0.008 (95%CI -0.057 ; 0.073) par mGy, pour un suivi médian de 4 ans. Malgré des premières estimations cohérentes avec les études précédentes, un suivi prolongé est nécessaire pour fournir une estimation de risque de tumeur cérébrale raisonnable. Les résultats montrent enfin une surestimation de risque attribuable aux scanners de l'ordre de 17 à 56% lorsque la présence de facteurs de risque de cancer n'est pas prise en compte.

Les apports attendus de cette étude, ainsi que du projet collaboratif européen (Epi-CT) dans lequel elle s'inscrit, sont de contribuer à une quantification raisonnable du risque afin de soutenir la décision de recours à l'examen irradiant, mais aussi à la compréhension des effets radio-induits aux niveaux habituels d'exposition.



Journées des thèses IRSN 2014



---

## **Analyse des actinides dans les fluides corporels par couplage entre des colonnes calix[6]arènes et la spectrométrie de masse à plasma inductif**

<b>Doctorant :</b>	<b>Sarah BAGHDADI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>09/03/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SDI/LRC-CNRS UMR7575- LECIME</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/DGA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Gérard COTE - ENSCP</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline BOUVIER-CAPELY</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris-Sud 11/ ED 534 MIPEGE</b>

---

En cas d'accident ou d'acte de malveillance, des particules radioactives, constituées notamment d'actinides, peuvent être relâchées dans l'atmosphère. Les actinides sont des émetteurs alpha issus du cycle du combustible ou présents à l'état naturel. Les particules alpha possèdent une forte énergie mais sont arrêtées par quelques centimètres d'air, la peau, etc., de sorte que les actinides sont néfastes principalement par contamination interne. De fait, ils ne peuvent pas être détectés directement par mesure externe et il faut procéder à des analyses d'excrétas.

Les analyses réalisées pour le suivi médical des travailleurs du nucléaire sont basées sur la mesure des actinides dans les urines par spectrométrie alpha, après préparation chimique. Cette méthode est fiable et exacte mais peut prendre jusqu'à quinze jours pour atteindre des limites de détection suffisamment basses pour quantifier des éléments comme l'américium. Elle est donc inadaptée aux situations d'urgence pour lesquelles il faudrait être capable de traiter rapidement un très grand nombre d'échantillons (résultat des analyses en moins de 24 heures).

La présente thèse vise à développer une méthode d'analyse des actinides reposant sur un couplage entre la chromatographie liquide (séparation des actinides) et l'ICP-MS (mesure).

Dans un premier temps, la durée de la préparation chimique a été significativement réduite, en remplaçant la minéralisation au four à moufle (24h) par une digestion sous micro-ondes (6h20).

Dans un second temps, notre travail a été centré sur l'optimisation des séparations chromatographiques. Ainsi, notre choix s'est porté sur une résine imprégnée de calixarène hydroxamique, celle-ci donnant de bons résultats pour le plutonium et l'américium en urine synthétique ou réelle (respectivement 91% et 88%). Les résultats plus hétérogènes obtenus pour l'uranium nous ont conduits à développer une urine synthétique complexe afin de comprendre pas à pas le rôle des divers constituants des urines. Ces études expérimentales sont par ailleurs complétées par des calculs de modélisation de la spéciation de l'uranium à l'aide du logiciel Medusa.

Enfin, nous avons montré que le couplage de la colonne calixarène avec l'ICP-MS permet une mesure en quelques minutes, ce qui valide d'ores et déjà notre approche. Les paramètres chromatographiques ont été optimisés et validés sur des urines synthétiques simples diluées pour un système semi-automatisé puis automatisé. Notre objectif est maintenant d'évaluer les performances analytiques de ce protocole à la fois en termes de temps d'analyse et de limites de détection sur des urines réelles.





## **Lundi 31 mars 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : G. HACHE*

#### **14h Session Sûreté « Accidents graves »**

- A. DECRETON Détermination expérimentale et modélisation thermodynamique du système Ag-Zr-In
- R. CLAVIER Etude expérimentale et modélisation des pertes de pression lors du renoyage d'un lit de débris
- S. CASTRILLON ESCOBAR Instabilités et dispersion des jets de corium liquides : analyse des processus physiques et modélisation dans le logiciel mc3d
- A. MABROUK Développement d'outils d'aide au diagnostic en contexte incertain : application aux diagnostics de situations accidentelles



Journées des thèses IRSN 2014



---

## Détermination expérimentale et modélisation thermodynamique du système Ag-Zr-In

<b>Doctorant :</b>	<b>Alexandre Decreton</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SAG/LETR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jacques Rogez - AMU</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Marc Barrachin</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>AMU/ED352</b>

---

Cette thèse s'inscrit dans une démarche d'amélioration des bases de données thermodynamiques de l'IRSN pour la simulation des accidents graves dans les réacteurs à eau sous pression, et plus particulièrement sur l'impact de la dégradation des crayons absorbants (Ag-In-Cd-Zircaloy-4) sur la liquéfaction du cœur combustible et les rejets de radioéléments dans l'environnement. Ce travail vise plus spécifiquement à déterminer la stabilité relative des différentes phases pouvant se former lors de la dégradation (stabilité représentée de manière générale par le diagramme de phases ou par la description de l'enthalpie libre des différentes phases).

Une revue critique des données existantes a permis de définir les mesures complémentaires à réaliser pour atteindre une description prédictive des diagrammes de phases les plus importants, c'est-à-dire Ag-Cd-In, Ag-Zr et In-Zr. Ce travail vise donc à obtenir ces données, à proposer une nouvelle modélisation de ces diagrammes pour en tirer des enseignements sur les mécanismes de dégradation et leurs conséquences.

Dans le diagramme Ag-Cd-In, il existe une forte incertitude sur la frontière (liquidus) séparant le domaine de stabilité de la phase liquide du domaine biphasé liquide + solide. Pour lever cette incertitude et modéliser plus précisément le diagramme, nous présentons des caractérisations par métallographie d'échantillons biphasés recuits, ce qui permet de connaître la composition à l'équilibre de la phase solide et de la phase liquide. Nous envisageons de compléter ce travail par des mesures de calorimétrie différentielle à balayage pour déterminer les températures des changements de phases.

Dans le diagramme Ag-Zr, la nature des équilibres entre les composés AgZr et AgZr<sub>2</sub> est sujet à caution et le liquidus n'est pas connu. L'élaboration des composés constitue un premier enjeu à cause de la volatilité de l'argent, de l'affinité du zirconium pour l'oxygène, et de la faible interdiffusion des éléments à l'état liquide. Une première étape a été de définir un protocole d'élaboration pour assurer la reproductibilité et l'homogénéité des échantillons. Les enthalpies de formation (contributions à l'enthalpie libre) des composés ont été ensuite déterminées par calorimétrie isotherme de dissolution en bain d'aluminium à 1000 K. Des écarts significatifs notamment sur l'enthalpie partielle de dissolution de Zr dans Al ont été relevés avec les valeurs existantes. Une interprétation est proposée pour expliquer ces différences. Des résultats obtenus par analyse thermique différentielle permettent de retracer les chemins de solidification des alliages et de déterminer les stabilités relatives des différentes phases.



Le système In-Zr est très largement inconnu. 5 composés définis ont été identifiés par le passé,  $\text{In}_3\text{Zr}$ ,  $\text{In}_2\text{Zr}$ ,  $\text{InZr}$ ,  $\text{InZr}_2$  et  $\text{InZr}_3$ . En revanche, les équilibres entre eux ne sont pas connus et il n'existe pas de données enthalpiques. Comme pour le système précédent, l'élaboration de ces composés représente un premier défi. Nous présentons les premières observations métallographiques des composés obtenus. Une procédure similaire à celle retenue pour Ag-Zr a été choisie pour la détermination des enthalpies de formation de ces composés. Les mesures de l'enthalpie partielle de dissolution de In dans Al effectuées et présentées dans ce travail sont en accord avec la littérature.

---

## Etude expérimentale et modélisation des pertes de pression lors du renoyage des lits de débris

<b>Doctorant :</b>	<b>Rémi Clavier</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SEREX/LE2M</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/EDF</b>
<b>Directeurs de thèse :</b>	<b>Michel Quintard - IMFT</b> <b>Florian Fichot - IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Nourdine Chikhi</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>SDU2E – INP Toulouse</b>

---

La refroidissabilité des lits de débris a été identifiée comme un enjeu majeur de sûreté et est l'objet de nombreux programmes expérimentaux. L'ébullition en milieu poreux est à la fois pilotée par les échanges thermiques et par les pertes de charge qui limitent la pénétration de l'eau dans le milieu. L'objectif de cette thèse est d'étudier les pertes de charge lors du renoyage d'un lit de débris : on s'intéresse à des lits de débris complexes pour des écoulements monophasiques ou diphasiques. Dans un premier temps, on se propose d'évaluer si une équivalence en termes de pertes de charge est possible entre un lit de débris réel et un lit de billes de taille uniforme, ou lit « monodisperse », et, si oui, d'identifier un diamètre équivalent pour le lit réel. L'intérêt de ce travail est double. Il doit permettre d'une part d'extrapoler les résultats des programmes expérimentaux réalisés sur des lits monodisperses, et d'autre part d'améliorer les modèles des codes de calculs « accident grave », où les lits de débris sont représentés par des lits monodisperses.

Pour atteindre cet objectif, une nouvelle installation expérimentale, CALIDE, a été construite par l'IRSN à Cadarache. Des mesures de pertes de charge générées par des écoulements monophasiques d'eau ou d'air à travers des lits de particules non sphériques ou des mélanges de billes ont été réalisées. La comparaison de ces mesures à un modèle validé pour les lits monodisperses, la loi d'Ergun, a permis d'identifier un diamètre équivalent.

Pour un mélange de billes sphériques, on a montré que le diamètre équivalent est égal à son diamètre de Sauter. Pour les lits de particules non sphériques, il dépend du nombre de Reynolds. Il est égal au diamètre de Sauter des particules aux faibles Reynolds, et au diamètre de Sauter multiplié par le coefficient de sphéricité aux forts Reynolds.

En conclusion, une loi générale unique est proposée pour les pertes de pression générées par des écoulements monophasiques dans des lits de particules non-sphériques ou de tailles multiples.



*La section d'essai de l'installation CALIDE  
contenant un lit de débris*

---

## **Instabilité et dispersion des jets de corium liquides : Analyse des processus physiques et modélisation dans le logiciel MC3D**

<b>Doctorant :</b>	<b>Sebastian CASTRILLON ESCOBAR</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SAG/B2EGR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Projet RSNR/ICE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel GRADECK - LEMTA, Université de Lorraine</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Renaud MEIGNEN (IRSN) Nicolas RIMBERT(LEMTA)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Nancy I – Energie, Mécanique, Matériaux – ED409</b>

---

Lors d'un accident grave avec fusion du combustible dans un réacteur nucléaire, le combustible fondu (corium) peut s'écouler sous forme de jet(s) dans le réfrigérant (eau). L'interaction entre les deux fluides est dite Interaction Combustible-Réfrigérant (ICR). Sous certaines conditions, elle peut conduire à une « explosion de vapeur » qui peut menacer le confinement. L'interaction débute par un mélange entre les fluides (phase de prémélange), se traduisant par une première fragmentation du corium et sa dispersion dans le réfrigérant.

L'objectif de la thèse est d'apporter des améliorations à la compréhension et à la modélisation de cette phase de fragmentation du corium. Cette thématique est un des axes majeurs du projet de recherche ICE (IRSN/CEA/LEMTA/EDF/AREVA) sélectionné par l'ANR dans le cadre du projet de Recherche en sûreté nucléaire et radioprotection (RSNR).

La fragmentation du corium est un processus multi-échelles où le jet de corium est transformé en une population de gouttes. La modélisation envisagée suppose un processus de fragmentation qui est le résultat d'une déstabilisation primaire pouvant être considérée comme une première fragmentation (du jet en grosses gouttes) pilotée par les grandes échelles de l'écoulement (zone de mélange) et d'un processus complexe de déstabilisation secondaire menant à une fragmentation finale dépendante des paramètres plus « locaux » de l'écoulement. Une première amélioration proposée a consisté à étendre le modèle actuel vers une description poly-dispersée des gouttes créées. Dans une seconde étape, nous avons étudié plus particulièrement les processus de fragmentation secondaire (de grosses gouttes en petites gouttes). Ces deux modèles seront couplés par la suite.

Cependant, des incompréhensions persistent au niveau de la physique de la fragmentation primaire et secondaire, en particulier dans les situations mettant en jeu du corium. La modélisation implémentée nécessite une description plus détaillée concernant l'impact du milieu ambiant diphasique (eau en ébullition) sur la fragmentation et l'impact de la solidification du corium. Des études plus ciblées sur ces aspects sont en cours de réalisation, notamment des simulations numériques directes (DNS) de fragmentation de gouttes. Nous envisageons pour la suite de mieux prendre en compte les turbulences de l'écoulement dans la description de la déstabilisation du jet et de sa fragmentation.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## **Développement d'outils d'aide au diagnostic en contexte incertain : application aux diagnostics de situations accidentelles**

<b>Doctorant :</b>	<b>Ahmed Mabrouk</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SAG/LETR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN et BelV (organisme de sûreté Belge)</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christophe Gonzales/ Université Pierre et Marie Curie</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>CHEVALIER-JABET Karine et CHOJNAKI Eric</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Ecole doctorale de l'université Pierre et Marie Curie (UPMC)</b>

---

Le diagnostic des scénarios d'accidents nucléaires graves représente à l'heure actuelle un enjeu majeur pour la sûreté nucléaire et la gestion de crise. Au cours de l'accident de Fukushima, des calculs de scénarios accidentels permettant d'expliquer les observations disponibles ont été menés avec ASTEC, le code de simulation d'accident grave de l'IRSN. Le peu d'informations disponibles, dont certaines se sont ensuite par ailleurs avérées peu fiables, a conduit à imaginer plusieurs scénarios explicatifs sans qu'il soit possible de leur attribuer un degré de crédibilité absolue ou relative.

Ainsi, ce travail de recherche vise à proposer un outil dédié à la modélisation et au diagnostic des scénarios d'accident à base de réseaux bayésiens. L'usage des réseaux bayésiens reposera sur l'apprentissage de bases de données de calculs créés avec le logiciel de calcul d'accident grave ASTEC. Les réseaux bayésiens sont issus de la théorie des graphes et de la théorie des probabilités, et permettent de représenter de manière synthétique et hiérarchisée cette base de connaissances. L'utilisation de réseaux bayésiens pourrait constituer une approche complémentaire aux études probabilistes de sûreté (EPS) en permettant de contourner les difficultés de représentation temporelle et de propagation des incertitudes inhérentes à ces dernières.

Le travail de la première année a été consacré à l'étude des scénarios d'accidents graves envisagés sur un réacteur à eau pressurisé (REP) sur la base d'une série de simulation de ces derniers au moyen d'ASTEC. A la lumière de cette première étape, il est apparu que les données accidentelles issues des simulations numériques sont reliées à la fois par des relations déterministes et probabilistes. Une telle contrainte pose un problème pour les algorithmes de construction des réseaux bayésiens qui supposent que toutes les relations entre variables sont de nature probabiliste. Le risque, si l'on ne tient pas compte de cette caractéristique, est de ne pas représenter correctement certains des liens existants entre certaines variables importantes, et donc de potentiellement conduire à des erreurs de diagnostic.

Notre effort au cours de cette thèse s'est donc tout d'abord focalisé sur une étude bibliographique des différentes approches prenant en considération les données de nature déterministe au moment de l'apprentissage, puis nous avons proposé une nouvelle approche qui d'après les premiers résultats montrent des gains d'efficacité par rapport aux méthodes existantes.



## Journées des thèses IRSN 2014

Des travaux de modélisations des scénarios accidentels élargis avec une possibilité d'intégration des connaissances expertes en amont et en aval de la tâche de modélisation viennent de démarrer.



## **Lundi 31 mars 2014**

### ***Salle Le Forum***

*Président de session : F. PAQUET*

#### **14h Session Radioprotection « Etude des effets biologiques des rayonnements ionisants »**

E. MINTET Changements phénotypiques des cellules endothéliales irradiées : implication de la transition endothélium-mésenchyme dans le développement des complications des radiothérapies

A. VAURIJOUX Etude des modifications génétiques et épigénétiques suite à une exposition aux rayonnements ionisants : lien entre dépôt d'énergie et devenir cellulaire

K. GOMBEAU Études des effets épigénétiques de l'uranium ou d'une irradiation gamma sur le cerveau et les gonades du poisson zèbre : caractérisation de biomarqueurs

F. PARISOT Etude mécaniste de la toxicité des radiations ionisantes chez *Daphnia Magna*



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Changements phénotypiques des cellules endothéliales irradiées : implication de la transition endothélium mésenchyme dans le développement des complications des radiothérapies

<b>Doctorant :</b>	<b>Elodie MINTET</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SRBE/L3R</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Agnès FRANCOIS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Agnès FRANCOIS</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ED 394 Physiologie physiopathologie/Paris 6</b>

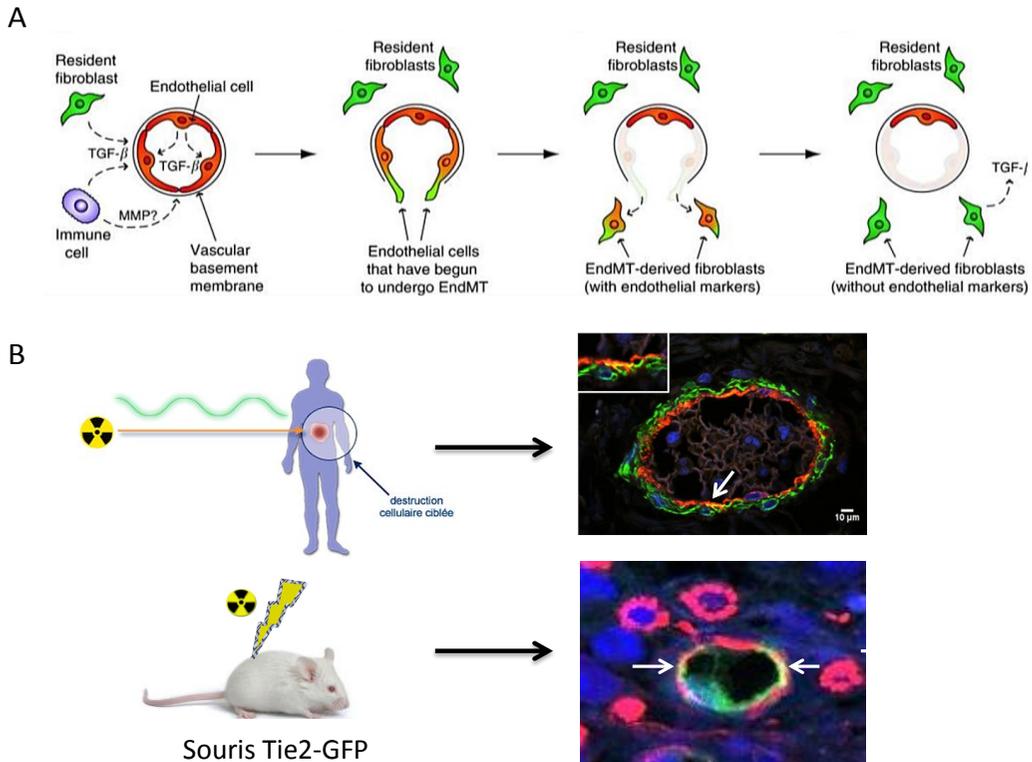
---

Près de 50% des patients traités par radiothérapie le sont pour une tumeur de la sphère abdomino-pelvienne. L'irradiation des tissus sains présents dans le champ d'irradiation provoque chez la plupart des patients, des atteintes digestives aiguës, qui dans 5 à 10% des cas évoluent en complications tardives de type fibrose digestive. La fibrose tissulaire est caractérisée par l'accumulation excessive de matrice extracellulaire synthétisée par les cellules mésenchymateuses. La transition endothélium-mésenchyme (EndoMT), est un processus au cours duquel les cellules endothéliales expriment des protéines spécifiques des cellules mésenchymateuses en réponse au stress. L'EndoMT a récemment été identifiée comme une source potentielle de cellules mésenchymateuses participant à la fibrose chez des patients atteints de maladies inflammatoires intestinales et dans un modèle préclinique d'inflammation digestive. Le but de cette étude est donc de déterminer le rôle de l'EndoMT dans le développement de la fibrose intestinale radio-induite.

*In vitro*, les mécanismes cellulaires et moléculaires impliqués dans l'EndoMT sont étudiés sur des cellules endothéliales (HUVECs) irradiées à 0, 2, 10 et 20Gy. L'EndoMT radio-induite est mise en évidence par une étude génique et protéique des marqueurs endothéliaux/mésenchymateux. L'irradiation induit une augmentation significative de l'expression des marqueurs mésenchymateux, tels que l'alpha smooth muscle actine ( $\alpha$ -SMA), associée à une diminution des marqueurs endothéliaux tels que le facteur Von Willebrand (vWF), 7 jours après une irradiation de 10Gy. De plus, il existe une augmentation de l'expression d'un acteur impliqué dans l'EndoMT, le facteur de transcription Hey2.

*In vivo*, des souris transgéniques exprimant la GFP (Green Fluorescente Protein) sous le contrôle du promoteur Tie2 spécifique des cellules endothéliales (modèle permettant d'identifier les cellules mésenchymateuses ayant une origine endothéliale), sont exposées à une dose unique de 27Gy centrée sur le rectum. Le processus d'EndoMT a ainsi été localisé dans les vaisseaux muqueux et sous-muqueux, 7 et 14 jours après irradiation.

Ces travaux ont donc montré pour la première fois l'existence de l'EndoMT radio-induite *in vivo*. De futures expériences, via l'utilisation de souris invalidées pour le gène HEY-2 spécifiquement dans l'endothélium, permettront de déterminer si l'EndoMT, via HEY-2, joue un rôle dans la sévérité des lésions colorectales radio-induites.



**Figure A :** Etapes du processus de transition endothélium-mésenchyme (EndMT). Perte de contact et d'adhérence des cellules endothéliales, expression de marqueurs mésenchymateux. Transdifférenciation en cellule mésenchymateuse de type myofibroblastique participant à la fibrose. (Schéma **Potenta et al, 2008**).

**Figure B :** Mise en évidence le l'EndMT chez l'Homme et la souris (Tie2-GFP) après irradiation. Co-expression de l' $\alpha$ -SMA et du facteur von Willebrand (flèche) sur des coupes de rectum Humain irradiés. Co-expression de l' $\alpha$ -SMA et de la GFP (flèches) sur des coupes de rectum de souris (Tie2-GFP) irradiés (27Gy).



---

## **Etude des modifications génétiques et épigénétiques des cellules suite à une exposition aux rayonnements ionisants : lien entre dépôt d'énergie et devenir cellulaire**

**Doctorant :** Aurélie VAURIJOUX  
**Date du début de la thèse :** 01/10/2012  
**Laboratoire :** PRP-HOM/SRBE/LDB  
**Financement de thèse :** IRSN  
**Directeur de thèse :** Joan-Francesc BARQUINERO – Université de Barcelone, Espagne  
**Tuteur de thèse :** Gaëtan GRUEL - PRP-HOM/SRBE/LDB  
**Ecole doctorale :** Université Paris-Sud 11 / ED Gènes Génomes Cellules

---

La réparation des cassures double-brin de l'ADN (CDB) est un événement-clé de la réponse aux radiations ionisantes qui, avec le profil génétique et épigénétique de chaque individu, peut déterminer la gravité des lésions des tissus exposés à ces radiations. Des modifications épigénétiques transitoires interviennent et permettent à la cellule de détecter la présence de CDB et de réguler les processus associés à leur réparation. Le premier rôle décrit pour ces modifications (Escargueil et *al.*, 2008) a été de permettre aux complexes enzymatiques de réparation de l'ADN d'accéder aux CDB. Des études récentes ont démontré que ces modifications participent également aux processus moléculaires intervenant dans le devenir de la cellule.

Afin de caractériser le rôle de ces modifications au sein d'une population cellulaire, nous avons étudié trois de ces modifications épigénétiques : la phosphorylation de la Ser139 de l'histone H2AX connue comme signalisant la CDB sous forme de foci  $\gamma$ H2AX (Rogakou et *al.*, 1998), la phosphorylation de la Tyr142 de l'histone H2AX décrite comme jouant un rôle de bascule moléculaire entre la réparation de la CDB et l'entrée en mort cellulaire des cellules (Cook et *al.*, 2009) et l'acétylation de la Lys16 de l'histone H4 qui serait impliquée dans l'entrée en senescence cellulaire (Contrepois et *al.*, 2012).

L'immunofluorescence permet le marquage spécifique de ces modifications d'histones au sein du noyau cellulaire. Ce marquage a été réalisé sur un tapis de cellules primaires humaines à différents temps après l'irradiation, avec une source de rayonnements X (4 MV). A partir de plusieurs milliers d'images acquises en microscopie à haut-débit et à fort grossissement, nous menons une analyse statistique des variations topologiques, qualitatives et quantitatives des marquages fluorescents associés aux dommages à l'ADN générés dans une population de cellules par l'irradiation. Les premiers résultats tendent à montrer des caractéristiques particulières au niveau des CDB associées aux différentes histones. Tout d'abord, la quantité d'ADN mesurée au niveau de ces CDB est, en médiane, plus élevée que dans le reste du noyau et ceci dès 10 minutes après irradiation et pour l'ensemble des temps étudiés. De plus, une augmentation de la quantité de la protéine H2AX (variant de l'histone H2A) est également mise en évidence sans modification significative de la phosphorylation de la Tyr142. Cette augmentation de la protéine H2AX potentiellement hypophosphorylée sur sa Tyr142 semble être associée plus spécifiquement aux foci  $\gamma$ H2AX résiduels observés à partir de 24 heures après l'exposition. Sachant que la présence de cette sous-population



de foci  $\gamma$ H2AX résiduels dans des cellules semble être associée à la senescence cellulaire (Rodier et *al.*, 2011), il est intéressant d'en réaliser une caractérisation plus précise pour comprendre leur origine et leur devenir. Des analyses actuellement en cours permettront apporter des éléments de réponses à ces questions.

---

## Modifications épigénétiques induites chez le poisson zèbre par une exposition chronique à des radionucléides

<b>Docteurant :</b>	<b>Kewin GOMBEAU</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>IRS[N]/PRP-ENV/SERIS/LECO</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>J.P. Bourdineaud Bordeaux 1, C. Adam-Guillermin IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>C. Adam-Guillermin</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ED251, AMU</b>

---

L'évaluation des effets d'une exposition chronique à de faibles doses de radionucléides passe nécessairement par l'étude des mécanismes d'action toxique à l'échelle subcellulaire, afin de mieux comprendre les processus de propagation d'effets jusqu'au niveau de la population voire des écosystèmes. Dans ce but, la caractérisation des mécanismes épigénétiques intervenant suite à une exposition à des doses environnementales de radionucléides est le point central de notre étude. En effet, ces mécanismes réversibles sont impliqués dans la régulation de l'expression génétique sans pour autant modifier la séquence de l'ADN.

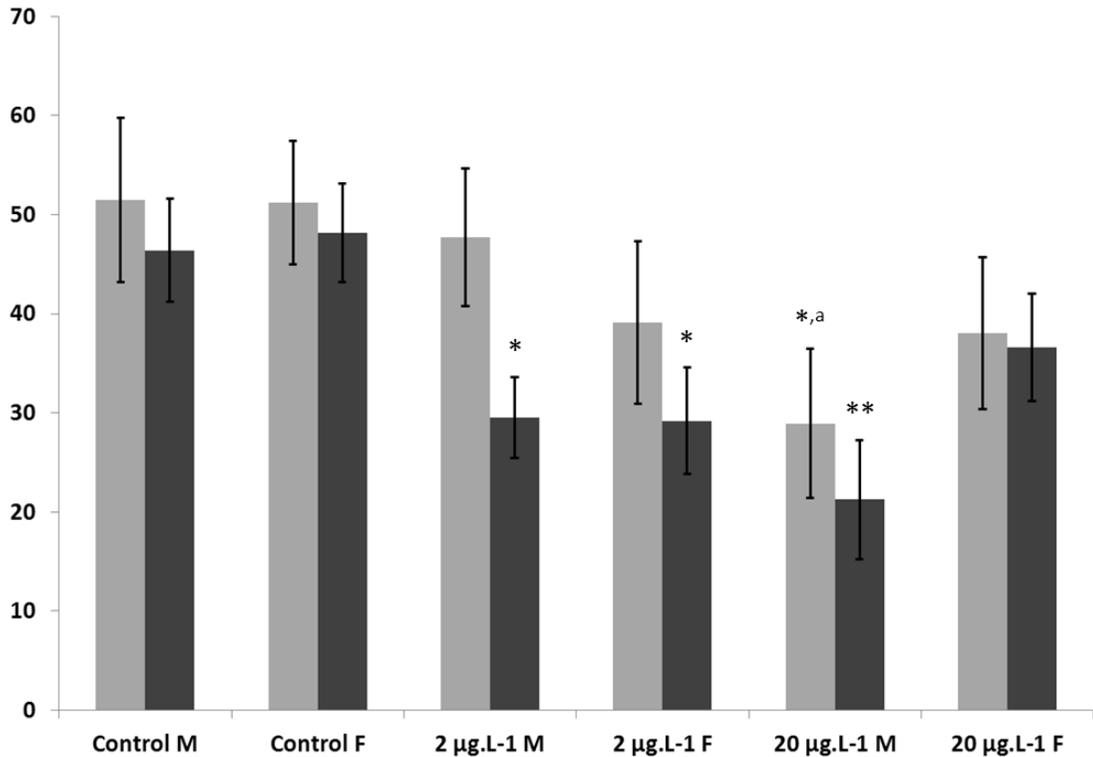
Cette thèse, inscrite dans le projet européen COMET (7<sup>e</sup> PCRD Euratom), porte ainsi sur les modifications épigénétiques induites chez le poisson zèbre par une exposition chronique à des radionucléides.

Lors d'une première expérience, des poissons zèbres mâles et femelles ont été exposés à 2 et 20  $\mu\text{g.L}^{-1}$  d'uranium appauvri durant 24 jours (concentrations retrouvées dans les eaux de surface à proximité de sites miniers). Les prélèvements de cerveaux, de gonades et d'yeux réalisés après 7 et 24 jours nous ont permis d'étudier la bioaccumulation de l'uranium ainsi que d'analyser les modifications épigénétiques (méthylation de l'ADN). L'impact génotoxique a également été vérifié par le test  $\gamma\text{H2AX}$ .

Dans un premier temps, l'étude des effets épigénétiques a été réalisée par AFLP-MS et HPLC-MS (données en cours d'acquisition). Les données recueillies mettent en évidence un impact conséquent de cette exposition sur le statut de méthylation avec une hypométhylation de l'ADN des organes étudiés. Cette hypométhylation apparaît précocement (dès 7 jours) et perdure dans le temps. Nous avons également noté que les mâles présentent la réponse la plus importante et cela en fonction de la dose d'exposition. En revanche, cette dynamique n'a pas été observée chez les femelles.

Pour affiner ces résultats, l'étude du profil de méthylation de régions spécifiques du génome est actuellement en cours (puces à ADN méthylé). Cette analyse nous permettra d'identifier des gènes cibles sujets à des modifications épigénétiques, et de relier ce constat à une possible altération des fonctions physiologiques encodées.

Une fois toutes ces informations acquises, nous envisageons de mener une étude comparative d'irradiation gamma externe de poissons mâles et femelles afin de confronter les réponses épigénétiques observées pour un radionucléide (plus chimiotoxique que radiotoxique) avec celles obtenues pour un stresser radiologique (collaboration avec la NMBU, Oslo).



**Figure 8.** Niveaux de méthylation mesurés dans le cerveau par AFLP-MS au cours de l'expérience. Les résultats sont sous la forme suivante : Moyenne  $\pm$  SEM ( $n = 15$ ; M = Mâle, F = Femelle). Les barres grises et noires représentent respectivement les valeurs après 7 et 24 jours d'exposition. \* Différence significative en comparaison aux témoins du même sexe (\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ). <sup>a</sup> Différence significative relativement aux mâles de la condition  $2 \mu\text{g.L}^{-1}$  ( $p = 0,02548$ ).

---

## Etude mécaniste de la toxicité des radiations ionisantes chez *Daphnia magna*

<b>Doctorant :</b>	<b>Florian Parisot</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV/SERIS/LECO</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Christophe Poggiale – Université Aix-Marseille</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frédéric Alonzo</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ED 251 Sciences de l'environnement</b>

---

Au cours de la dernière décennie, les effets des rayonnements ionisants sur les espèces non-humaines ont suscité un intérêt scientifique croissant pour la protection des écosystèmes (FASSET, 2003 ; ERICA, 2004). Cependant, l'évaluation actuelle de leurs potentiels effets sur l'environnement se heurte à un manque de pertinence tant d'un point de vue écologique que biologique.

Comprendre comment ces rayonnements affectent les espèces lors de conditions environnementales réalistes et à différents niveaux d'organisation biologiques pertinents du point de vue écologique est un enjeu majeur en écotoxicologie et en radioécologie. La thèse s'inscrit dans le cadre du réseau européen STAR (STrategy for Allied Radioecology) visant notamment à développer des approches avancées dans l'évaluation des effets de faibles doses écologiquement pertinentes pour la protection des écosystèmes.

Dans ce contexte, ce projet de thèse vise à explorer les altérations de l'ADN suite à une irradiation gamma externe chronique à faible dose et leurs liens potentiels avec les effets sur la survie, la croissance et la reproduction chez un micro-crustacé représentatif des écosystèmes aquatiques, la daphnie. Les expériences d'exposition au Cs137 menées au cours de trois générations successives (75 jours) sur une gamme de débits de dose allant de 0,007 à 35,4 mGy/h avaient pour objectif d'évaluer :

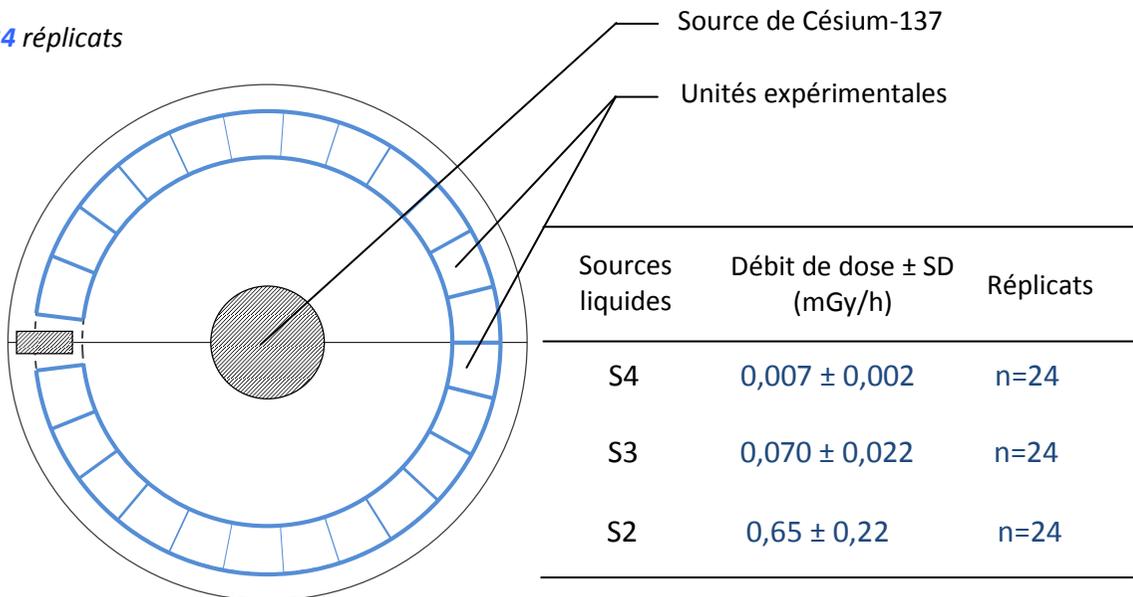
- l'accumulation et la transmission des altérations de l'ADN estimées à l'aide d'une technique d'amplification aléatoire de l'ADN polymorphe (RAPD-PCR)
- les effets sur le budget énergétique de la daphnie, analysés au travers du suivi de la croissance et de la reproduction.

Les résultats mettent principalement en évidence une réduction de la fécondité à 35,4 mGy/h lors de la première génération, des effets moins sévères à la deuxième génération quelle que soit la dose concernée et un retard de croissance et de ponte à la troisième génération à partir de 0,075 mGy/h. Les effets génotoxiques sont en cours d'analyse à l'UMR-EPOC (Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux) d'Arcachon.

En perspectives, l'intégration des données expérimentales dans un modèle mécaniste de type DEBtox (DynamicEnergy Budget applied to Toxicology) –décrivant la manière dont un organisme alloue l'énergie à ses différentes fonctions vitales (croissance, reproduction, réparation des dommages...) en présence d'un stress radiologique– permettra de préciser le ou les modes d'actions moléculaires et métaboliques induit(s) au fil des générations par les radiations ionisantes sur la daphnie

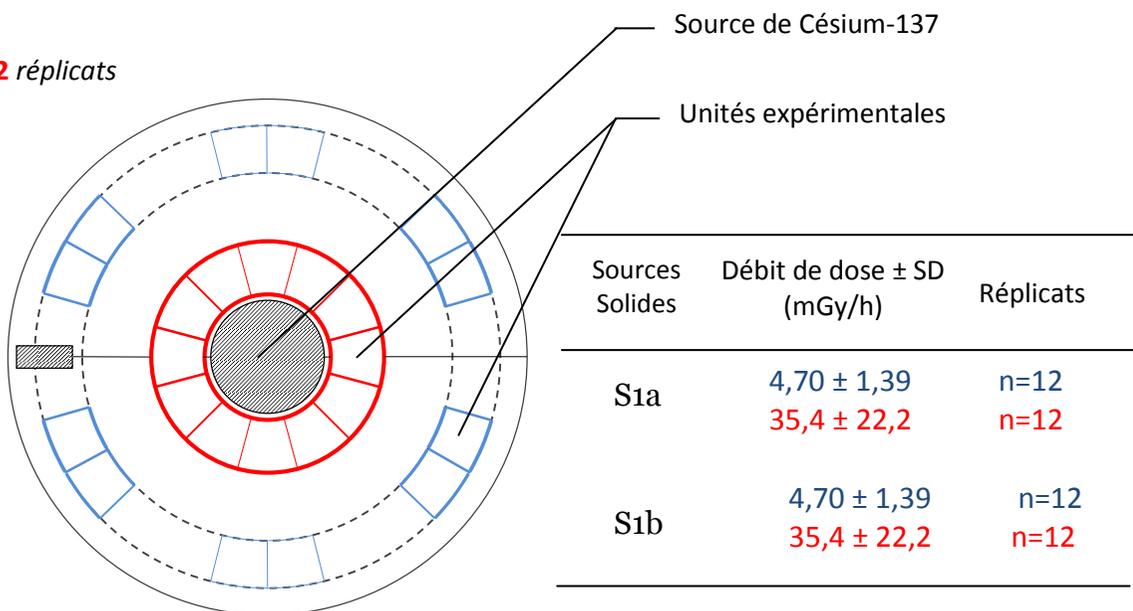
Figure : Schéma du dispositif expérimental

24 répliquats



Dispositif expérimental pour les sources S4, S3 et S2

12 + 12 répliquats



Dispositif expérimental pour les sources S1a et S1b



## **Lundi 31 mars 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : D. BOULAUD*

#### **15h50 Session plénière Radioécologie**

Conférencier invité : Pascal BAILLY DUBOIS

M. BELHARET Modélisation numérique de la dispersion en mer des radionucléides rejetés lors de l'accident de la centrale de Fukushima et transfert au milieu biologique

M SY Quantification des incertitudes sur la simulation des transferts dans l'environnement terrestre de radionucléides émis lors d'un accident et l'évaluation de l'exposition des populations humaines par voie alimentaire

A. CUVIER Accumulations de l'uranium, de ses descendants et des éléments trace métalliques dans les sols de zones humides autour des anciens sites miniers

C. DUFRESNES Compréhension et analyse des processus hydrosédimentaires dans la baie de Toulon. Apport à la modélisation de la dispersion des radionucléides



Journées des thèses IRSN 2014



---

## **Modélisation numérique de la dispersion en mer des radionucléides rejetés lors de l'accident de la centrale de Fukushima et transfert au milieu biologique**

<b>Doctorant :</b>	<b>Mokrane Belharet</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02/04/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV/SESURE/LERCM</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Claude Estournel - LA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Sabine Charmasson</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPS/SDU2E</b>

---

Une forte contamination radioactive du milieu marin s'est produite après l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi le 11 mars 2011. Ces éléments radioactifs ont été rapidement transférés aux organismes marins, engendrant ainsi une forte contamination de certaines espèces marines prélevées dans cette zone (Buessler et al., 2012; Madigan et al., 2012; Tateda et al., 2013).

Afin de simuler de façon dynamique l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans les différents organismes marins, un modèle radioécologique couplé avec un modèle de l'écosystème et un modèle de dispersion des radionucléides en mer, a été appliqué. Ce modèle prend en compte les deux voies de contamination à savoir l'accumulation directe à partir de l'eau et l'accumulation à partir de l'assimilation de proies contaminées.

Les résultats de 3 ans de simulation (2010-2011-2012) de la concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans le plancton sont, spatialement et temporellement, en bon accord avec les observations. Ces résultats mettent également en évidence une forte variabilité spatiale de ces concentrations après l'accident due à la dispersion fortement anisotrope engendrée par les courants (dispersion dépendante de certains courants forts et permanents comme le Kuroshio, privilégiant ainsi certaines directions de dispersion par rapport à d'autres).

L'application du modèle à l'étude de la contamination de la sardine montre l'importance de la prise en compte des mouvements migratoires de cette espèce dans la prédiction de leurs niveaux de contamination par le  $^{137}\text{Cs}$  dans une situation d'accident, situation caractérisée par une variabilité spatiale extrêmement forte de la concentration de ce radionucléide dans l'eau et dans la nourriture.

---

## **Quantification des incertitudes sur la simulation des transferts dans l'environnement terrestre de radionucléides émis lors d'un accident et l'évaluation de l'exposition des populations humaines par voie alimentaire.**

<b>Doctorant :</b>	<b>Mouhamadou Moustapha SY</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>11/02/2013</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV / SERIS / LM2E</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/Région PACA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Marie SIMON-CORNU - IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Marie SIMON-CORNU</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Aix Marseille Université Sciences de l'Environnement - ED251</b>

---

L'IRSN a mené une évaluation des doses potentiellement reçues par les populations humaines suite à l'ingestion de denrées (locales) contaminées par les dépôts radioactifs consécutifs à l'accident de Fukushima. Les incertitudes présentes dans les modèles mis en œuvre (par exemple dans la plateforme SYMBIOSE) obligent les acteurs de la gestion des risques à retenir des hypothèses pénalisantes. Le principal enjeu de ma thèse est la quantification des incertitudes relatives aux processus de transfert des éléments radioactifs dans les écosystèmes et particulièrement la mise en évidence de leur impact dans les modèles de calcul de dose ingérée à l'homme.

Le paramètre d'interception, quantifiant la contamination captée par la végétation est un des paramètres radioécologiques cruciaux en situation post-accidentelle puisque les légumes-feuilles (interceptant le panache puis consommés) sont, dans le cas de l'accident de Fukushima comme dans beaucoup d'autres scénarios, les aliments contribuant le plus à la dose par ingestion des premiers mois. Cependant, les valeurs associées à ce paramètre se révèlent incertaines comme le souligne la revue de la littérature internationale sous l'égide de l'AIEA (TRS 472).

Dans ce contexte une méta-analyse a été menée sur des données d'interception foliaire issues de la littérature scientifique et d'expérimentations de l'IRSN, en utilisant une modélisation bayésienne hiérarchique permettant de distinguer les différentes espèces végétales représentées. Cette méthodologie a été appliquée à un jeu de données concernant six éléments radioactifs (argent, baryum, césium, iode gazeux, strontium et tellure) déposés par temps sec à la surface des végétaux (salade, herbe de pâturage, et feuilles d'autres végétaux). Le facteur d'interception (i.e. ratio entre la quantité de radionucléides interceptée par les feuilles et la quantité totale de radionucléides déposée) est modélisé par une transformation logit et par un modèle de croissance non-linéaire intégrant la biomasse aérienne des plantes.

Au-delà de cette étude de cas, ma réflexion se poursuit plus généralement autour des enjeux méthodologiques soulevés par l'analyse des incertitudes des modèles d'évaluation des risques alimentaires suite à l'émission atmosphérique accidentelle de substances radioactives et s'inscrit également dans le cadre des activités de recherche du projet européen COMET.



---

## **Accumulation de l'uranium, de ses descendants et des éléments traces métalliques dans les sols des zones humides autour des anciens sites miniers**

<b>Doctorant :</b>	<b>Alicia Cuvier</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>15/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>EcoLab/LERCM</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN-Région Midi-Pyrénées</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Laurent Pourcelot IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Gaël Le Roux EcoLab</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>SDU2E Université de Toulouse</b>

---

Des études récentes soulignent l'accumulation de radionucléides naturels près d'anciennes mines d'uranium en relation avec la direction préférentielle de cours d'eau collectant les eaux de ruissellement et les rejets aqueux issus de la mine. L'impact environnemental est d'autant plus important dans le cas d'un pré-traitement du minerai *in situ*.

Le but de cette étude est de déterminer et de comprendre la distribution des radionucléides issus des chaînes de désintégration U-Th dans l'environnement amont et aval de deux anciens sites miniers français : Bertholène (Aveyron (12) et St Alban sur Limagnole (Lozère (47))). Le site de Bertholène a fait l'objet d'une extraction *in situ* de l'uranium via une lixiviation en tas du minerai utilisant l'acide sulfurique. A St Alban, le minerai a seulement été extrait.

Au cours de cette thèse, nous avons réalisé une cartographie par spectrométrie gamma de la répartition des radionucléides naturels sur les deux sites, associée à des mesures d'activités *in situ* et en laboratoire après échantillonnage, dans le but de déterminer les activités et les déséquilibres dans les sols et sédiments. Différentes techniques d'identification minéralogiques et chimiques comme la diffraction X, la microscopie électronique et l'extraction séquentielle (protocole standardisé du BCR) ont également été mises en œuvre, afin de déterminer les phases porteuses des radionucléides et leur répartition dans les échantillons.

Les mesures d'activités des échantillons de Bertholène révèlent que celles-ci peuvent atteindre 21000 Bq/Kg dans des sols situés en aval du site et régulièrement inondés par un ruisseau traversant la mine. Ces sols sont également marqués par un fort déséquilibre (figure 1) entre le début et la fin de la chaîne de l'U-238. Selon les premiers résultats de l'extraction séquentielle, l'uranium semble principalement associé aux oxydes de fer et de manganèse dans ces sols contaminés. Sur le site de St Alban, les activités de la chaîne de l'U-238 sont plus faibles et la chaîne est globalement à l'équilibre séculaire (figure 1). Cette différence entre ces deux sites est probablement une conséquence directe de la différence de traitement du minerai.

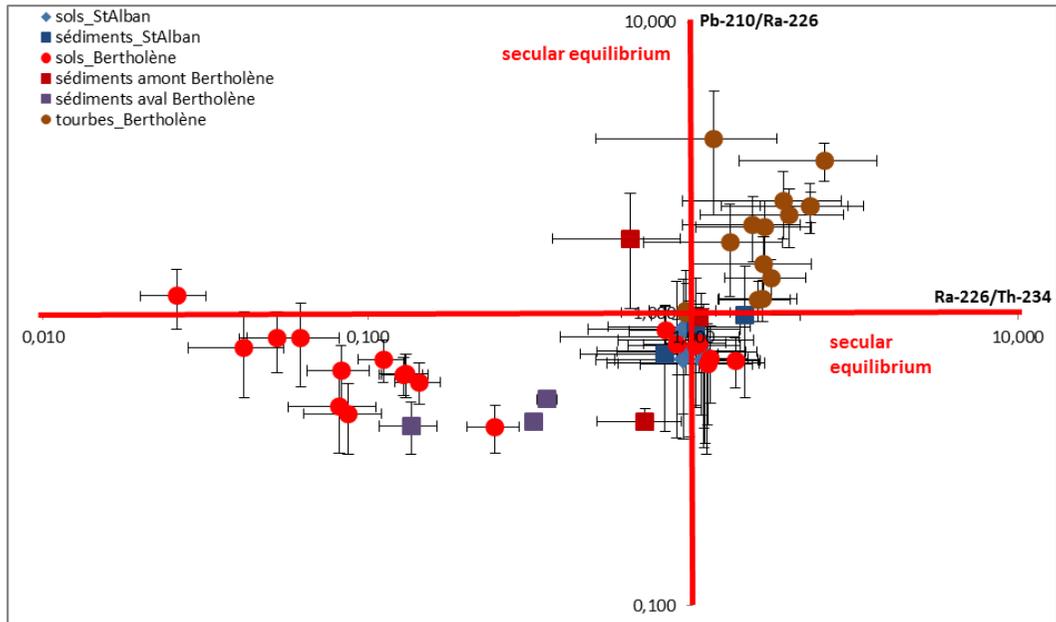


Figure 1 : Distribution des rapports d'activités au sein de la chaîne de l'U-238 pour les sols et les sédiments des deux sites miniers considérés

---

## **Compréhension et analyse des processus hydro-sédimentaires de la Baie de Toulon : apport à la modélisation de la dispersion des radionucléides.**

<b>Doctorant :</b>	<b>Christiane DUFRESNE</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02/11/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV / SESURE / LERCM</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/Région PACA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Vincent Rey – Mediterranean Institute of Oceanology</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline Duffa</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de Toulon /E.D. Sciences et Mer</b>

---

L'accident nucléaire de Fukushima de mars 2011 a montré l'importance de pouvoir simuler le devenir des radionucléides en milieu marin et de disposer d'un outil de gestion post-accidentelle. Ainsi, le Laboratoire d'Etudes Radioécologiques en Milieu Continental et Marin (LERCM) met en place un modèle hydro-sédimentaire de la Rade de Toulon, port d'attache de bâtiments à propulsion nucléaire. En plus de leur décroissance radioactive, le devenir des radionucléides en mer est conditionné par de nombreux processus physiques, tels l'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire.

Puisque certains radionucléides présentent une affinité particulière pour la phase particulaire, les sédiments jouent le rôle de source ou de puits de contamination par la remise en suspension et le dépôt. La précision du modèle hydro-sédimentaire sera ainsi déterminante sur la prévision du devenir de la contamination à moyen et long terme.

Les premiers travaux réalisés portent sur l'étude de la circulation et la validation du modèle hydrodynamique. Des comparaisons entre simulations et mesures en mer ont montré la capacité du modèle à reproduire les principaux processus hydrodynamiques ainsi que l'impact et l'importance de la précision du forçage météorologique. Les résultats du modèle ont également été utilisés afin de calculer les temps d'échanges de masses d'eau, fortement liés aux conditions de vent. Des simulations de dispersion de traceur ont également étoffé cette analyse.

D'autre part, les apports des bassins versants ont été étudiés afin d'être utilisés comme données d'entrées du modèle. Des instruments de mesure mouillés dans les deux cours d'eau pendant 18 mois ont permis de qualifier (analyse granulométrique) et de quantifier les flux liquides et solides, très dépendants des régimes hydrologiques (périodes d'étiage et crues très marquées). Le devenir de ces apports a ensuite pu être suivi grâce aux données enregistrées en mer à proximité des exutoires. L'évolution du panache turbide en surface et les périodes de remise en suspension et de dépôt au fond ont été étudiés. Ces mesures en mer permettront finalement de calibrer le modèle hydro-sédimentaire sur la zone. En effet, la vitesse de chute et les tensions critiques de dépôt et d'érosion doivent encore être validées. La Figure 1 montre la concentration de matière en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) en surface simulée par le modèle dans son état actuel. A terme, différents scénarios pourront être simulés afin d'identifier les zones impactées en cas de rejet accidentel.

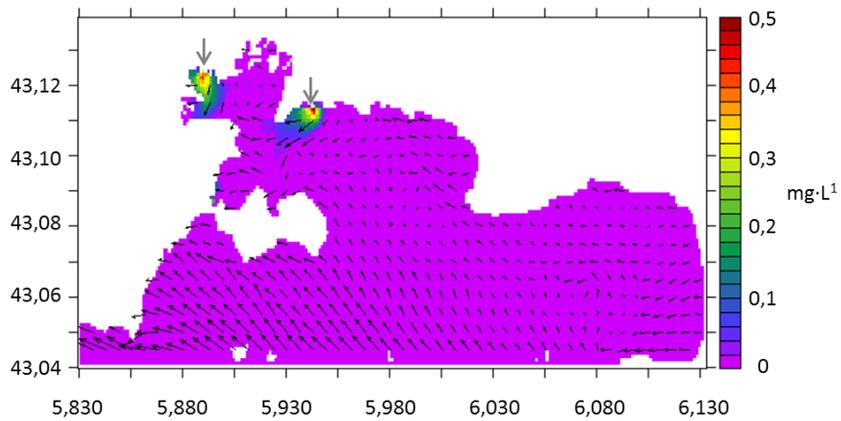


Figure 2 : Concentration de matière en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et courants de surface (flèches noires) simulés par le modèle hydro-sédimentaire avec les apports des fleuves (exutoires marqués par les flèches grises)



**Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

*Salle Le Loft*

*Président de session : J. GARNIER-LAPLACE*

**9h Session plénière Radioprotection « Radiotoxicologie »**

A. BUISSET-GOUSSEN Études des effets chroniques des rayonnements ionisants chez un organisme modèle, *Caenorhabditis elegans* : du moléculaire à la dynamique des populations, via le développement d'un modèle bioénergétique

C. LE GALLIC Influence d'une contamination chronique par ingestion de césium 137 sur la progression de la pathologie athéromateuse

D. DRUBAY Analyse de la relation dose-réponse aux faibles doses et faibles débits de dose pour les risques de mortalité par cancer et par maladie cardiovasculaire chez les mineurs d'uranium



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Etudes des effets chroniques des rayonnements ionisants chez un organisme modèle : *Caenorhabditis elegans*, du moléculaire à la dynamique des populations

<b>Doctorant :</b>	<b>Adeline Buisset-Goussen</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>02/11/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV/SERIS/LECO</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>région PACA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>J-C Poggiale (COM)</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Catherine Lecomte-Pradines</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ED 251 (AMU)</b>

---

L'évaluation de l'impact écologique d'une exposition aux rayonnements ionisants (phénomène naturel et ubiquiste enrichi par les activités humaines) est devenue une préoccupation majeure. Il existe à ce jour peu d'études relatives aux expositions chroniques sur plusieurs générations, indispensables pour mieux comprendre les perturbations liées aux rayonnements ionisants et leurs conséquences possibles sur la population.

Le nématode *Caenorhabditis elegans*, est un organisme ubiquiste naturellement présent dans le sol. Son cycle de vie court (3 jours), son taux de reproduction élevé facilitent sa culture en laboratoire et en font un organisme modèle pour les études en exposition chronique. Son génome est entièrement séquencé et les outils génétiques disponibles en font un excellent modèle pour étudier les mécanismes cellulaires et moléculaires intervenant lors d'une exposition à une pollution.

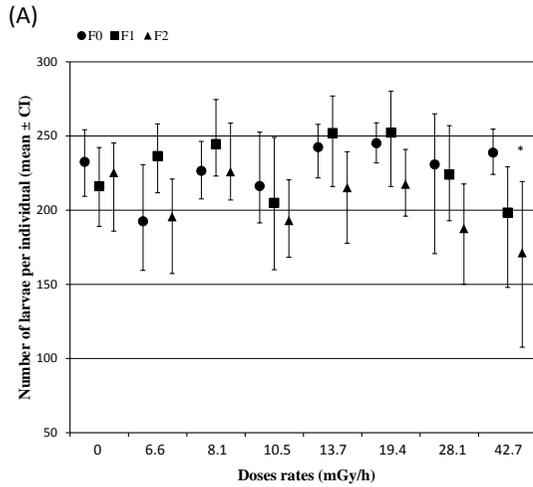
Dans une première étude, les nématodes ont été exposés individuellement à des débits de dose compris entre 6,6 et 42,7 mGy/h. Deux statuts d'exposition ont été testés : trois générations ont été continuellement exposées d'une part (F0, F1 et F2) et, d'autre part, seule la première génération a été exposée et les deux générations suivantes ont été placées en environnement témoin (F0, F1' et F2').

Cette expérience a montré

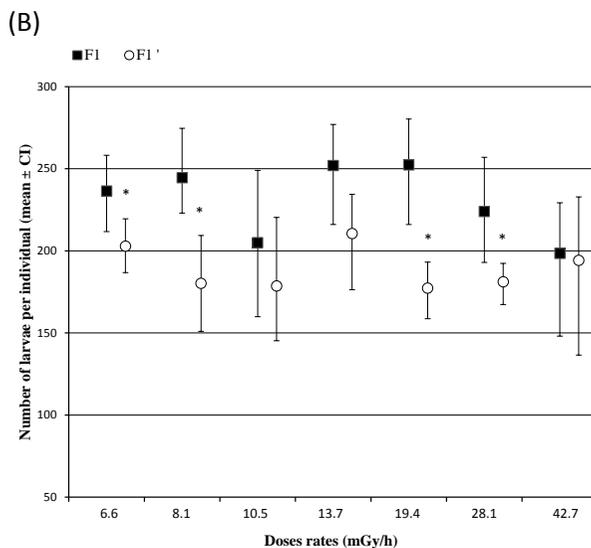
- qu'il n'y a pas d'effet sur la croissance,
- que la reproduction (nombre de larves cumulées par individus) est le critère d'effet le plus sensible lorsque les nématodes sont soumis à une irradiation chronique,
- qu'il y a une transmission d'effet de la génération parentale (F0) à la deuxième génération (F1').

Une seconde étude a été réalisée pour caractériser les effets moléculaires/cellulaires d'une exposition chronique de *Caenorhabditis elegans* aux rayonnements ionisants. Trois générations de nématodes ont été exposées depuis le stade œuf pendant 65h (temps nécessaire à la maturation des gonades) à 8.1 et 42.7 mGy/h. Après exposition, le niveau d'expression de gènes impliqués dans le processus d'apoptose (mort cellulaire programmée) et le taux de dommages à l'ADN ont été mesurés sur la lignée germinale. En parallèle, un suivi de la reproduction a été effectué.

Cette expérimentation devrait apporter des éléments de réflexion sur les mécanismes subcellulaires susceptibles d'expliquer les effets observés sur la reproduction.



**Figure 1 (A).** Pontes totales cumulées de *C. elegans* issues des générations exposées (F0-F1-F2). Chaque point représente la moyenne du nombre de larve  $\pm$  IC (intervalle de confiance d'une loi de Poisson) avec  $n = 10$  pour le témoin et  $n = 7$  pour les débits de dose étudiés. \* représente une différence significative entre les générations ( $p < 0.05$ )



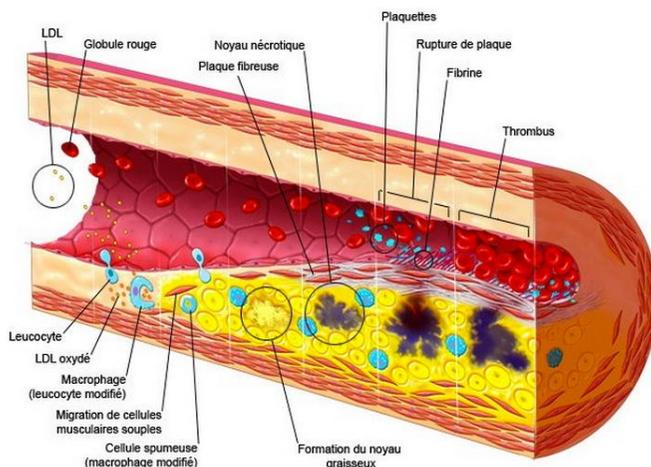
**Figure 1 (B).** Pontes totales cumulées de *C. elegans* issues de la 2ème génération exposée (F1) et placée en milieu non exposé après exposition parentale (F1'). Chaque point représente la moyenne du nombre de larve  $\pm$  IC (intervalle de confiance d'une loi de Poisson) avec  $n = 7$  pour les débits de dose étudiés. \* représente une différence significative entre les générations ( $p < 0.05$ )

## Effets d'une exposition chronique à faible dose au césium 137 sur la progression de la pathologie athéromateuse

Docteurant :	Clélia Le Gallic
Date du début de la thèse :	07/11/2011
Laboratoire :	PRP-HOM / SRBE / LRTOX
Financement de thèse :	EDF / IRSN
Directeur de thèse :	Stéphanie LEHOUX
Tuteur de thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Ecole doctorale :	Université Paris Sud – ED 425 : Innovation thérapeutique du fondamental à l'appliqué ; pôle pharmacologie & toxicologie

Lors d'accidents nucléaires comme Fukushima ou Tchernobyl, d'importantes quantités de radionucléides sont disséminées dans l'environnement. Parmi eux, le césium 137 constitue le principal élément contaminant les populations avoisinantes (demi-vie  $\approx$  30 ans), qui sont ainsi exposées par l'ingestion chronique de denrées contaminées. Les conséquences sanitaires non-cancéreuses dues à une telle ingestion chronique restent mal connues, et en particulier les effets sur le système cardiovasculaire. Bien qu'il existe une corrélation entre l'exposition à forte doses de rayonnements ionisants et le développement de pathologies cardiovasculaires, concernant les faibles doses les résultats sont divergents. En effet, il est difficile d'individualiser le risque lié aux radiations des autres facteurs de risques des pathologies cardiovasculaires. Il est donc primordial de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de caractériser les mécanismes physiopathologiques impliqués.

**L'objectif de cette thèse est de déterminer les effets d'une exposition chronique au césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) à faible dose sur une éventuelle progression ou potentialisation de l'athérosclérose, 1<sup>ère</sup> cause de mortalité-morbidité dans les pays industrialisés.**



Une approche *in vivo* s'appuie sur un modèle murin développant la maladie de manière chronique (souris ApoE<sup>-/-</sup>). Ces souris sont exposées au  $^{137}\text{Cs}$  à différentes concentrations 4, 20 ou 100 kBq/l, *via* l'eau de boisson, pendant 3, 6 ou 9 mois dans le but de suivre la progression de l'athérosclérose.

Aux étapes précoces de la pathologie (3 mois), nous observons une augmentation du remodelage vasculaire, caractérisé par l'augmentation de l'épaisseur de la média, associée à une augmentation de l'expression de certaines



cytokines pro-inflammatoires (VCAM1, IFN $\gamma$ ) chez les animaux prédisposés exposés à la concentration de 100 kBq/l de  $^{137}\text{Cs}$ . En parallèle, nous avons mis en évidence une modulation de l'expression génique d'enzymes « anti-oxydantes » (glutathion peroxydase, catalase).

Aux étapes intermédiaires (6 mois) et tardives (9 mois) de progression de la pathologie, les paramètres moléculaires inflammatoires restent inchangés quels que soient les groupes d'animaux. De plus, la caractérisation phénotypique des plaques d'athérome ne montre aucune différence majeure entre les groupes (évaluation de la taille, de la stabilité et de la composition).

Ces résultats suggèrent la mise en place d'une réponse compensatoire au cours du temps. En effet, le remodelage vasculaire observé au temps précoce associé à l'augmentation des défenses anti-oxydantes reste transitoire et ne semble pas porter à conséquence sur le développement et la progression de la pathologie à long terme.

Afin d'identifier les mécanismes qui pourraient être impliqués dans le remodelage vasculaire, des études *in vitro* sur des CML exposées au  $^{137}\text{Cs}$  sont en cours. Cette étude ouvre également une piste d'étude des mécanismes adaptatifs après exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants.

---

## Analyse de la relation dose-réponse aux faibles doses et faibles débits de dose pour les risques de mortalité par cancer et par maladie cardiovasculaire chez les mineurs d'uranium

<b>Doctorant :</b>	<b>Damien Drubay</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SRBE/LEPID</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>AREVA/IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Dominique Laurier - IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Estelle Rage</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Sud XI, Paris Descartes Ecole doctorale de santé publique</b>

---

Les mineurs d'uranium sont exposés chroniquement aux rayonnements ionisants (RI) (radon et à ses descendants à vie courte, rayonnements gamma, poussières d'uranium). Alors que les études épidémiologiques ont observé une relation entre le risque de décès par cancer pulmonaire et l'exposition cumulée au radon, la question du risque de cancers extra-pulmonaires et de pathologies non-cancéreuses se pose.

Un premier objectif était d'étudier le risque de décès par cancer du rein chez les mineurs d'uranium français et allemands. Ce travail a été présenté l'an dernier, montrant une absence d'association significative avec l'exposition aux RI. L'article est en cours de révision positive pour publication dans *Radiation and Environmental Biophysics*.

Le second objectif est d'étudier l'association entre ces différentes expositions et le risque de décès par maladie de l'appareil circulatoire (MAC) pour lesquelles une augmentation significative du risque de mortalité par maladie cérébro-vasculaire (MCV) associée à l'exposition cumulée au radon a été observée.

Une étude cas-témoins (n=313 dont 76 décès par MAC) nichée au sein de la cohorte française a été réalisée pour recueillir un certain nombre de facteurs de risque : surpoids, consommation de tabac, hypertension artérielle, pouls élevé, diabète, glycosurie, hypercholestérolémie, hypertriglycéridémie, hyperuricémie, insuffisance rénale chronique et gamma glutamyl transpeptidase (GGT). L'association entre l'exposition aux RI et le risque de décès par MAC, maladie cardiovasculaire ischémique et MCV a été étudiée à l'aide du modèle de Cox.

Les facteurs recueillis sont associés à une augmentation du risque de décès par MAC, statistiquement significative pour le pouls élevé, le tabac, l'hypertriglycéridémie et le taux de GGT. L'association entre l'exposition au radon et le risque de MAC est positive (Hazard Ratio:  $HR_{MAC\_radon}=1,46$  IC<sub>95%</sub>[0,72; 2,94];  $HR_{MCV\_radon}=2,28$  IC<sub>95%</sub>[0,57; 9,13]), mais non statistiquement significative du fait de la réduction d'effectif et des faibles expositions par rapport à la cohorte entière. La prise en compte des facteurs de risque modifie légèrement la valeur du coefficient estimé ( $HR_{MAC\_radon}=1,47$  IC<sub>95%</sub>[0,67; 3,24];  $HR_{MCV\_radon}=1,87$  IC<sub>95%</sub>[0,47; 7,46]), ce qui pourrait indiquer l'existence d'une association entre l'exposition aux RI et l'évolution des facteurs de risque. Des investigations concernant ce lien seront menées pour mieux comprendre l'impact de l'exposition aux RI sur le risque de MAC.



Journées des thèses IRSN 2014



## **Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : R. GONZALEZ*

#### **10h45 Session plénière Sûreté « Confinement »**

S. DELCOUR Étude des mécanismes physico-chimiques de mise en suspension de contaminants particulaires lors de la dégradation thermique de matériaux représentatifs des installations nucléaires

P. MARCHAL Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation

S. BOURROUS Étude du colmatage de filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

Z. MANA Étude de la suspension de particules à l'intérieur d'un local sous l'effet de la marche d'un opérateur



Journées des thèses IRSN 2014

---

## **Etude des mécanismes physico-chimiques de mise en suspension de contaminants particuliers lors de la dégradation thermique de matériaux représentatifs des installations nucléaires**

<b>Doctorant :</b>	<b>Simon Delcour</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LPMA</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>José-Marie Lopez-Cuesta – Ecole des Mines d’Alès</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>François-Xavier Ouf</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Mines-ParisTech / ED SFA</b>

---

L'évaluation des conséquences d'un incendie dans une installation nucléaire de type laboratoire ou usine, et de l'éventuelle dispersion des matières radioactives qui peut en résulter, constitue un enjeu majeur pour l'IRSN. Le cas des feux de boîtes à gants présente un intérêt tout particulier de par leur fabrication en matériaux polymères combustibles (polyméthacrylate de méthyle – PMMA - et polycarbonate) et la contamination résiduelle en particules radioactives qu'elles contiennent (oxydes d'uranium et de plutonium, majoritairement).

Plusieurs études macroscopiques, à petite et à grande échelle, ont été réalisées pour évaluer les fractions de contaminants mises en suspension. Ces études ont permis d'identifier des ordres de grandeur des fractions remises en suspension, mais aucune étude phénoménologique n'a été menée sur cette thématique. Le seul phénomène clairement identifié dans cette problématique est le « flash d'émission » observé par tous les auteurs pour le PMMA. Ce phénomène a toujours été relié au comportement bullant du PMMA, mais, jusqu'à présent, aucun modèle prédictif de mise en suspension de particules lors de l'éclatement des bulles n'a été proposé.

Cette présentation détaille un modèle en cours de développement, qui s'appuie sur un code de calcul de la dégradation thermique d'un polymère (ThermaKin). Ce code permet de déterminer l'évolution temporelle des paramètres de la dégradation thermique (perte de masse et profil de température). A partir de ces données, le modèle représente la distribution des bulles sur la surface, ainsi que l'évolution temporelle et spatiale d'un dépôt de particules perturbé par ces bulles. Des résultats préliminaires ont été obtenus et seront comparés à des mesures de cinétique d'émission.

En parallèle du développement de ce modèle, un dispositif expérimental, (baptisé ARTEMIS – Appareil de dégradation Thermique pour l'Etude de la Mise en Suspension) a été conçu et réalisé, afin de mesurer de la manière la plus précise possible la cinétique d'émission des particules. L'objectif de cette installation est de fournir des données fiables de fractions remises en suspension et de cinétiques d'émission pour différents scénarios de combustibles et de contamination. Les résultats obtenus sur cette installation seront présentés et confrontés au modèle de mise en suspension.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation

<b>Doctorant :</b>	<b>Pierre MARCHAL</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LECEV</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / EDF CIDEN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Gérard GREHAN – CNRS CORIA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Emmanuel PORCHERON</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>INSA Rouen</b>

---

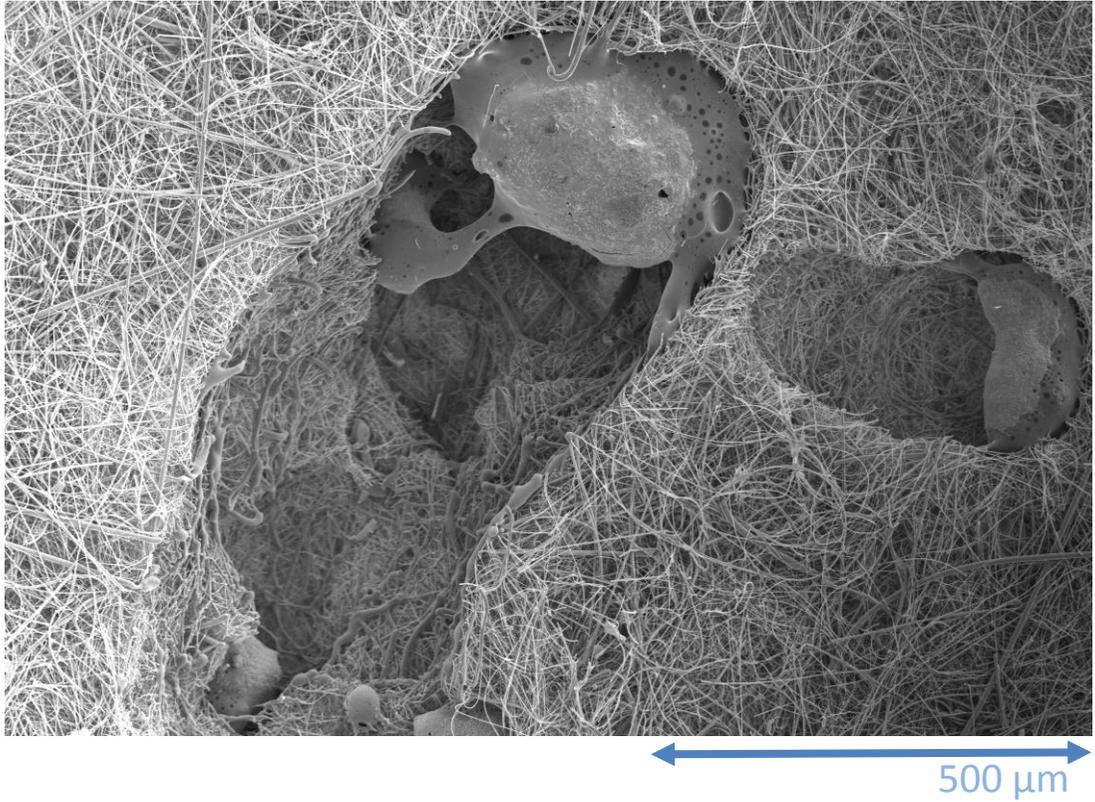
La mise en œuvre de procédés mécaniques ou thermiques de type découpe ou abrasion dans des chantiers d'assainissement ou de démantèlement d'installations nucléaires génère une production de particules métalliques incandescentes. Ces particules peuvent être entraînées dans les réseaux de ventilation et conduire à une perforation, voire à une inflammation du premier niveau de filtration, ce qui constitue un risque de dégradation des barrières de confinement avec potentiellement un risque de départ d'incendie.

L'objectif de cette étude est de déterminer, à la source, les caractéristiques (température, diamètre et vitesse) des particules incandescentes produites par une disqueuse, ainsi que l'évolution de ces caractéristiques pendant le temps de vol des particules jusqu'à leur impact sur le médium filtrant. La mise en corrélation de ces données avec le niveau d'endommagement du médium filtrant doit permettre de mieux identifier les situations qui représentent un risque d'agression du dispositif de filtration et d'en déduire l'impact sur le maintien de l'intégrité du confinement des installations.

L'installation expérimentale CAPIMIF qui reproduit un sas de chantier de démantèlement, permet de simuler des conditions représentatives de coupes à l'aide d'une disqueuse automatisée. Aussi, un ensemble de moyens instrumentaux a été implémenté et validé sur cette installation pour caractériser en vol les particules produites.

Par ailleurs, l'effet de l'impact des particules incandescentes sur le médium filtrant est déterminé par une approche globale et une approche locale. L'approche globale consiste à quantifier la dégradation du filtre à partir de la mesure de l'efficacité de filtration. L'approche locale permet de quantifier les mécanismes mis en jeu dans la dégradation du médium par le biais de visualisations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) (Figure 1), qui ont ainsi permis d'observer l'interaction d'une particule métallique incandescente avec les fibres de verre composant le médium du filtre. Des essais analytiques sont réalisés, soumettant le filtre à des contacts ponctuels avec une certaine énergie thermique et cinétique, permettant de déterminer le trio taille/température/vitesse requis pour dégrader le médium filtrant.

Enfin, une analyse en cours corrélant la perte d'efficacité du filtre obtenue par l'approche globale et les caractéristiques des particules doit permettre d'identifier les particules responsables de cette dégradation et les configurations de découpe à risque.



*Figure 3 - Visualisation au Microscope Electronique à Balayage d'un filtre impacté par des particules incandescentes*

---

## Etude du colmatage des filtres THE plans et à petit pli par des particules nanostructurées simulant un aérosol de combustion

<b>Doctorant :</b>	<b>Soleiman BOURROUS</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>14/11/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LECEV</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / Camfil SAS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Dominique THOMAS -CNRS LRGP</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Laurent Bouilloux</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>RP2E NANCY</b>

---

La contribution des filtres plissés à Très Haute Efficacité (THE) au maintien du confinement des radionucléides dans une installation nucléaire de base est essentielle en assurant le piégeage des aérosols, principaux constituants des sources de contamination. Aussi, des recherches ont été entreprises afin de caractériser le comportement, notamment en termes d'évolution du colmatage, de filtres THE soumis à des contraintes représentatives de situations accidentelles telles que l'incendie.

Ainsi, l'objectif de ce travail est d'obtenir des données expérimentales sur le colmatage des filtres THE par des aérosols de combustion et de développer *in fine* des modèles ou corrélations prédictives de l'évolution de la perte de charge de filtres THE. Ces modèles contribueront à la prédiction rapide du comportement des réseaux de ventilations en cas d'incendie.

La démarche retenue pour cette étude se décompose en deux parties, l'une portant sur les filtres plans et l'autre sur les filtres plissés. En effet, le colmatage d'un filtre THE par des aérosols solides se déroule en trois phases, la filtration profonde, la filtration en surface et la réduction de surface, chacune découlant de l'interaction entre les particules, le fluide porteur et le filtre. Les deux premières phases du colmatage sont le fruit de l'interaction particules/medium tandis que la dernière est due au remplissage du pli et ne concerne donc que les filtres plissés.

Pratiquement, des expérimentations sont réalisées sur des échantillons de filtres THE à différentes échelles, permettant d'étudier individuellement chacun des phénomènes à l'œuvre lors du colmatage :

- le colmatage d'un medium plan permet d'étudier l'interaction medium/aérosol par microscopie électronique (Filtration profonde),
- un dispositif optique conçu et fabriqué spécialement permet de mesurer les caractéristiques du dépôt de particules (Filtration en surface),
- un dispositif permet le colmatage d'un pli unique en observant *in situ* le remplissage du pli et sa déformation grâce à des moyens métrologiques optiques (Réduction de surface).

Ces expériences ont permis d'identifier et de mesurer les paramètres qui régissent les différentes étapes du colmatage d'un filtre. Sur cette base, un modèle de colmatage permettant le calcul de l'évolution de la perte de charge d'un filtre exposé à des aérosols et des conditions aérauliques connus, est développé.

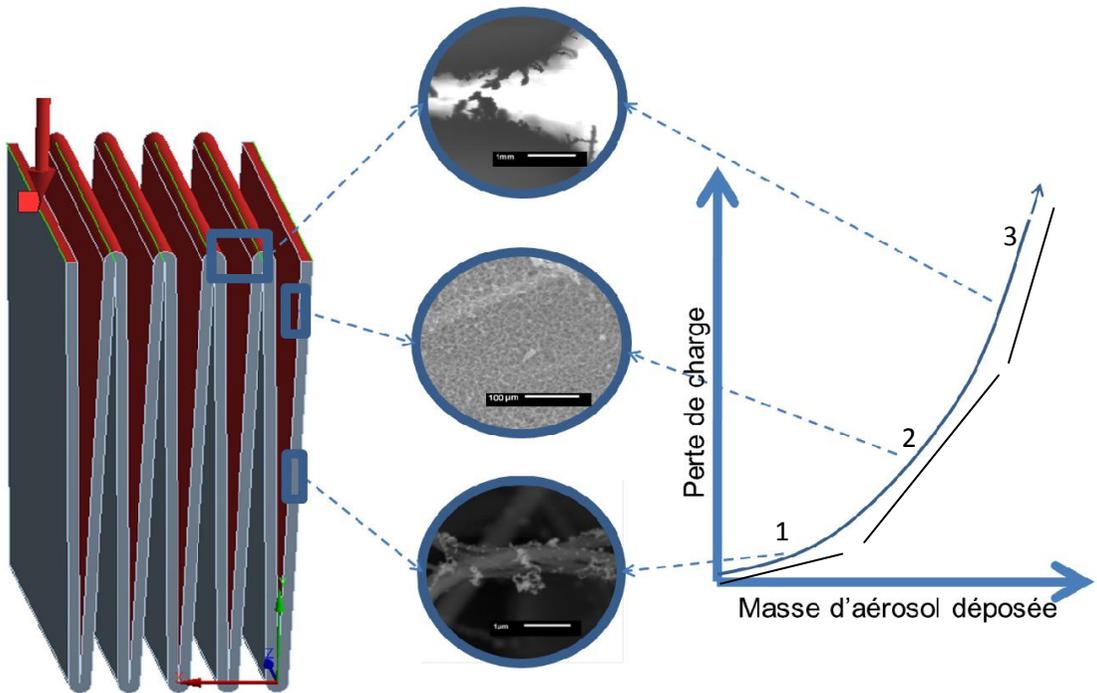


Figure 4- illustration des trois phases du colmatage d'un filtre plan (1- Filtration profonde, 2- Filtration en surface, 3- Réduction de surface)

---

## Etude de la remise en suspension de particules à l'intérieur d'un local ventilé sous l'effet de la marche d'un opérateur

<b>Doctorant :</b>	<b>Zakaria MANA</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/12/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LPMA</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/EDF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Marc RABAUD - FAST</b>
<b>Tuteurs de thèse :</b>	<b>François GENSDARMES - Laurent RICCIARDI</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Sud - MIPEGE</b>

---

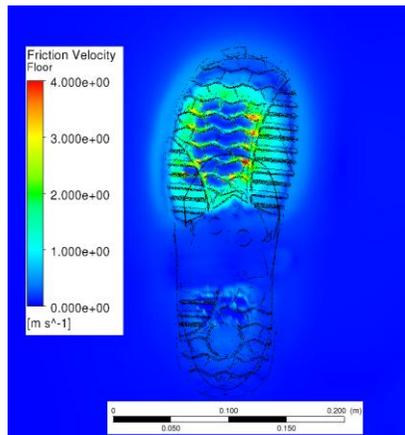
Dans les installations nucléaires, en particulier en phase de maintenance, les opérateurs sont amenés à circuler sur des sols contenant des particules potentiellement radioactives de faible diamètre ( $0,5 \mu\text{m} < d_p < 20 \mu\text{m}$ ), qui peuvent être remises en suspension lors de la marche et sont susceptibles d'être inhalées. Le but des travaux de thèse est de déterminer le taux de remise en suspension des particules dû à l'interaction des chaussures avec le sol au cours de la marche. Ce taux correspond au nombre de particules émises au niveau du sol par unité de temps, rapporté à la concentration surfacique des particules initialement déposées.

L'originalité des travaux consiste en la réalisation de simulations numériques assurant le couplage du calcul des écoulements d'air produits par les mouvements d'une chaussure et du calcul du taux de mise en suspension local (en chaque maille au niveau du sol), par l'implémentation du modèle de mise en suspension Rock'n'Roll (Reeks et Hall, 2001).

Après une première étape de validation (analytique et expérimentale), les simulations d'écoulements liés au mouvement d'une chaussure de sécurité dans un cycle de marche ont permis de déterminer des ordres de grandeur des vitesses de frottement. Ainsi, lors de la pose de la chaussure au sol, pour une vitesse angulaire moyenne de  $180^\circ/\text{s}$ , la vitesse de frottement maximale est de l'ordre de 4 m/s.

En parallèle, des mesures de forces d'adhésion par la méthode AFM (*Atomic Force Microscopy*) permettent d'adapter une corrélation liant la distribution des forces d'adhésion au diamètre des particules, en se basant sur des particules d'alumine et d'oxyde de cobalt en contact avec une surface de sol peint (revêtement époxy). L'implémentation du modèle Rock'n'Roll intégrant cette corrélation permettra d'obtenir des taux moyens de remise en suspension pour le cas de la marche.

Les résultats des simulations numériques seront ensuite comparés aux résultats des expériences qui ont été menées dans un local ventilé. Les taux de remise en suspension de particules d'alumine de diamètre aérodynamique de  $1,6 \mu\text{m}$  sont de l'ordre de  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . D'autres expériences sont en cours afin de déterminer la dépendance de la remise en suspension vis-à-vis de différents paramètres.



*Champ de la vitesse de frottement sous  
une chaussure de sécurité lors du  
contact avec le sol*



## **Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : B. CHAUMONT*

#### **13h45 Session Sûreté**

J. GOULIER Comportements aux limites de flammes de prémélange hydrogène/air/diluants. Étude de la transition flamme laminaire-flamme turbulente

J. TRINCAL Modélisation du comportement de l'iode dans l'atmosphère

T. LE DEZ Approche par similitude du couplage des effets thermiques et du vent sur les transferts de masse dans les réseaux aérauliques des bâtiments complexes

G. FERRAN Méthodes avancées pour le traitement des données nucléaires



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Comportements aux limites de flammes de prémélange hydrogène/air/diluants. Étude de la transition flamme laminaire- flamme turbulente

<b>Doctorant :</b>	<b>Jules Goulier</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN CNRS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Nabiha Chaumeix - CNRS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Nicolas Meynet</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université d'Orléans</b>

---

Dans le cadre de l'étude d'accidents graves dans un réacteur à eau pressurisée, le risque hydrogène est défini comme étant la possibilité d'une perte de l'étanchéité ou de l'intégrité du confinement du réacteur suite à une combustion d'hydrogène. Lors de la phase de dégradation du cœur, l'hydrogène est principalement issu de l'oxydation du zirconium présent dans les gaines entourant le combustible et de l'oxydation des métaux présents dans le bain de corium. L'évaluation du risque d'explosion d'hydrogène a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment sur la phénoménologie de la combustion.

La propagation d'une flamme peut se faire suivant deux principaux modes : la déflagration (subsonique par rapport aux gaz frais) et la détonation (célérité supersonique). Pour les régimes de propagation intermédiaires, on parle de flammes accélérées. Dans une déflagration, l'écoulement des gaz à travers le front de flamme peut être laminaire ou turbulent. En régime laminaire, la vitesse de flamme est une grandeur caractéristique des gaz frais et donc une propriété intrinsèque du mélange. En régime turbulent, la vitesse de propagation de la flamme dépend de l'intensité de la turbulence. Cette turbulence peut être générée par l'encombrement et la géométrie du milieu ou par la flamme elle-même.

Les travaux de thèse s'appuient sur trois installations : deux bombes sphériques à inflammation centrale, SF2 et SF3, de respectivement 56 et 95 litres, et Enaccef, une enceinte verticale encombrée d'obstacles. Les bombes sphériques ont servi à :

- l'optimisation de la procédure de traitement d'images, étape fondamentale pour l'étude des vitesses de flammes,
- la génération par ventilateurs d'une turbulence contrôlée et la caractérisation de la vitesse du fluide à l'aide de la vélocimétrie par images de particules (cf. Figure 1),
- la détermination des limites d'inflammabilité en présence de turbulence,
- l'établissement d'une corrélation déterminant la vitesse de propagation de flammes des mélanges H<sub>2</sub>/air/diluants pour différentes intensités de turbulence.

L'installation Enaccef, générant une turbulence non-contrôlée, sera utilisée pour produire des essais permettant de valider la corrélation développée sur la bombe sphérique SF3.

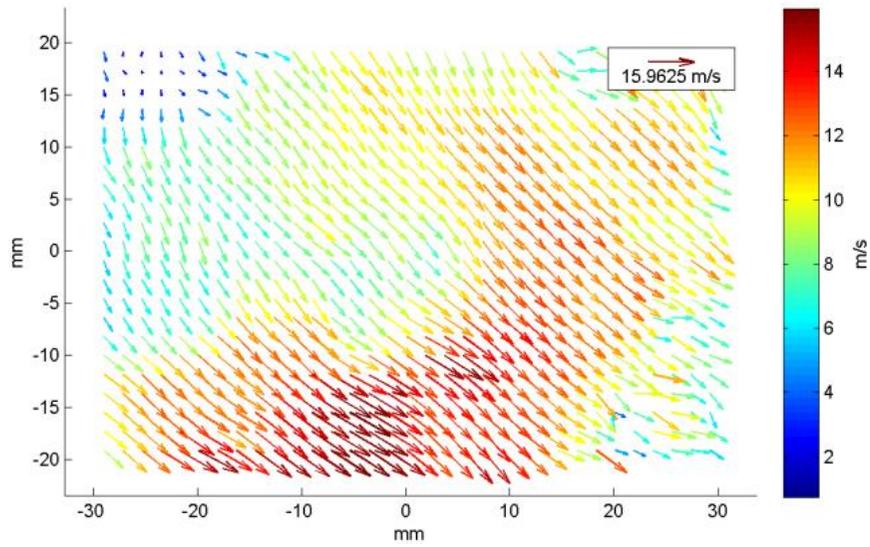


Figure 5 : Champ 2D de vitesse instantanée à une rotation de 6000Hz

---

## Chimie de l'iode dans l'atmosphère

<b>Doctorant :</b>	<b>Julien Trincal</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>10/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>IRSN-RES/SAG/LETR - C3R (labo commun)</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN et BelV organisme de sûreté Belge</b>
<b>Directeurs de thèse :</b>	<b>Valérie Fèvre-Nollet (Univ. Lille 1-PC2A)</b> <b>Laurent Cantrel (IRSN)</b> <b>Frédéric Cousin (IRSN)</b>
<b>Tuteurs de thèse :</b>	<b>Patrick Lebègue (Univ. Lille 1-PC2A)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Univ. Lille 1 / ED SMR</b>

---

Les codes de calculs utilisés à l'IRSN en cas de rejets accidentels de radiocontaminants depuis une installation nucléaire ne tiennent compte que des effets de dispersion et de rabattement, ils considèrent les espèces rejetées comme inerte chimiquement. Pour l'iode dont la réactivité dans l'atmosphère est amplement discutée dans la littérature, cette hypothèse est clairement à reconsidérer.

Le but de cette thèse est de coupler un mécanisme cinétique de la chimie de l'iode avec un code de dispersion atmosphérique, et d'évaluer l'impact potentiel de cette réactivité sur les résultats de la simulation d'un scénario accidentel de référence qui reste à définir.

Les travaux jusqu'alors effectués ont consisté à la mise au point d'un mécanisme cinétique de l'iode dans l'atmosphère le plus complet possible. Ainsi une large étude bibliographique a été réalisée et a permis d'établir un mécanisme constitué de 140 réactions faisant intervenir l'iode dans le système élémentaire { I - H - O - N - C }. A ces réactions viennent s'ajouter les 237 réactions de RACM [1], axées autour de la chimie des polluants ( $O_3$ ,  $NO_x$ ) et des espèces carbonées (VOC).

Il apparaît cependant, au travers de la littérature, un manque de données concernant les réactions carbonées de l'iode. En fin de thèse, des travaux de chimie théoriques pourraient être menés afin de réduire ces manques.

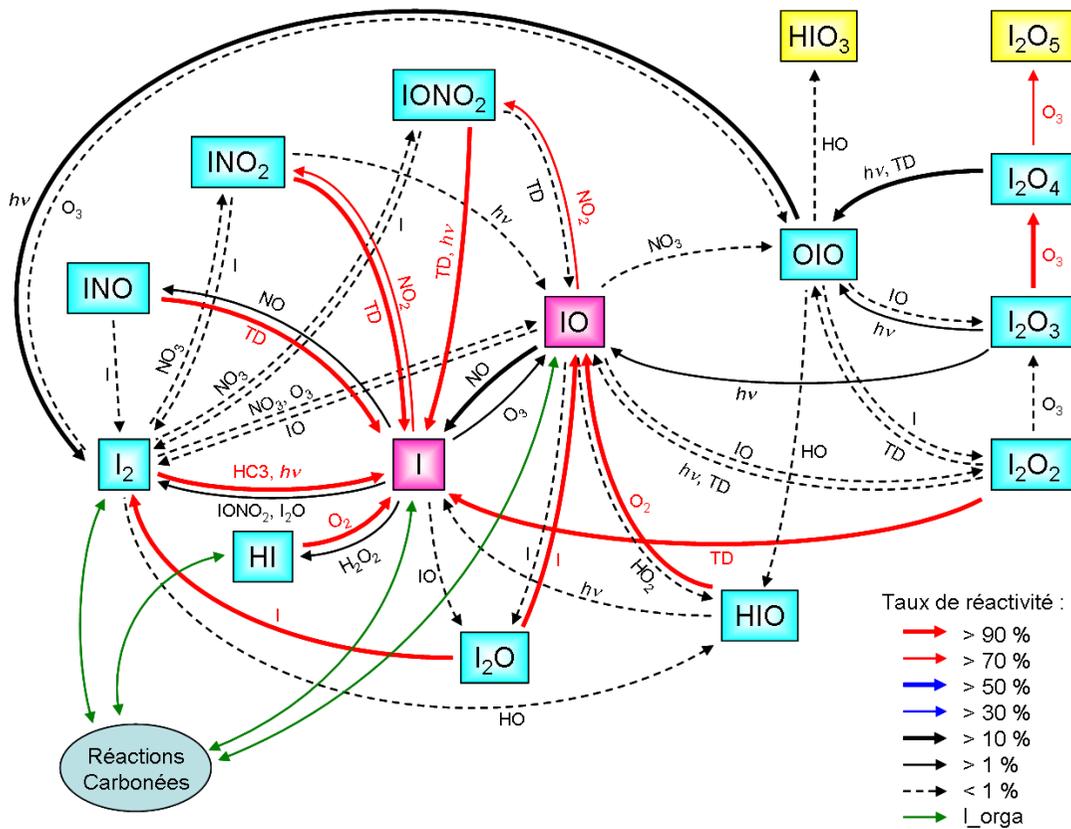
Afin de mieux comprendre la chimie de l'iode en atmosphère, des simulations en modèle de boîte 0D (uniquement action des cinétiques de réactions chimiques) ont été réalisées, permettant alors de déterminer les réactions prédominantes du mécanisme.

Au cours de la seconde année, la plateforme de calcul Polyphémus [2] a été prise en main. Elle permet d'effectuer des calculs de dispersion via le code de chimie-transport Polair3D. La prochaine étape des travaux sera d'incorporer le mécanisme réactionnel dans la plateforme Polyphémus, les simulations 3D permettront alors d'évaluer l'impact de la réactivité de l'iode sur les dépôts pour un scénario accidentel donné.

[1] RACM : Regional Atmospheric Chemistry Model, Stockwell et al. (1998)

[2] Polyphémus : système complet de simulation de la qualité de l'air, mis au point au CERE (Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique)

Schéma du mécanisme réactionnel issu d'un calcul OD, à midi, système { I-H-O-N-C + RACM },  
injection continue de  $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $h\nu$  = Photolyse, TD = Décomposition Thermique



---

## **Étude par similitude du couplage des effets thermiques et du vent sur les transferts de masse dans les réseaux aérauliques des bâtiments complexes**

<b>Doctorant :</b>	<b>Thomas LE DEZ</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LEMAC</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/CSTB/LaSIE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Christian INARD (Université La Rochelle – LaSIE)</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Jérôme RICHARD / Xavier FAURE (CSTB) / François DEMOUGE (CSTB)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de La Rochelle / SI-MMEA</b>

---

Les installations nucléaires sont dotées d'un réseau de ventilation qui permet de maintenir une cascade de pression entre les différents locaux. Les écoulements d'air se font alors des locaux à risques les plus faibles vers les locaux à risques plus élevés ce qui contribue au confinement des matières radiologiques. Néanmoins, ceci peut être significativement perturbé en cas de vent important occasionnant localement des zones de dépression ou de surpression autour de l'installation pouvant amener à des inversions de débit au sein du réseau.

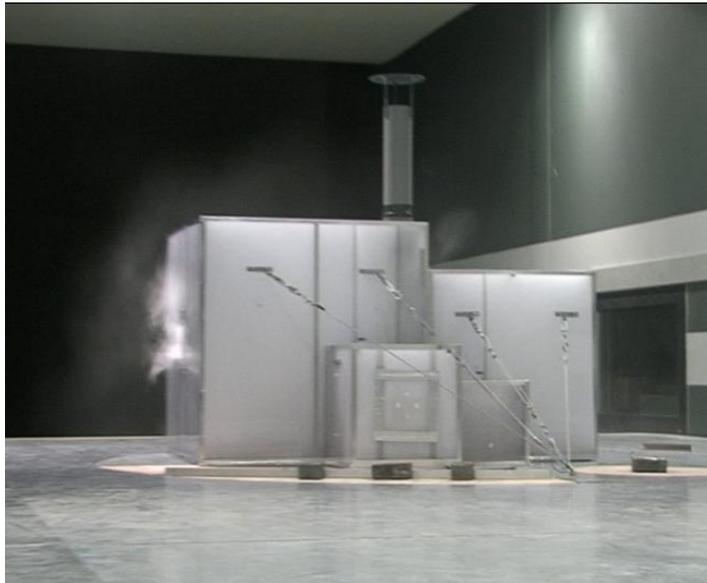
Ces situations peuvent être étudiées numériquement au moyen du code SYLVIA qui simule le comportement d'un réseau de ventilation. Afin de valider ce code, il est très délicat de faire des essais à échelle réelle. Aussi, il a été décidé d'adopter une démarche par similitude consistant à reproduire à échelle réduite les effets du vent sur un réseau de ventilation.

Des travaux précédents, ne concernant que des écoulements isothermes, ont été menés avec succès dans cette optique. L'objectif de cette thèse est d'intégrer la problématique liée aux dégagements thermiques. Le cas où le réseau de ventilation est arrêté doit également être considéré car les influences des sources de chaleur et du vent sur les transferts de masse dans le réseau de ventilation sont alors maximales.

Le travail réalisé a permis d'élaborer un modèle adimensionnel stationnaire à partir des équations implémentées dans le logiciel SYLVIA. Cette étape a mis en évidence la nécessité de la conservation du nombre de Froude, notamment pour reproduire correctement les scénarios d'arrêt du réseau de ventilation et a permis de faire les choix nécessaires à la conception d'une maquette de réseau de ventilation (valeur des rapports d'échelle notamment)

L'objectif de la deuxième année de thèse sera de réaliser cette maquette puis d'étudier expérimentalement son comportement dans la soufflerie du CSTB. Pour cela, une qualification progressive des éléments composant le réseau de ventilation de la maquette (ventilateurs, filtres THE, fuites inter-locaux,...), de la métrologie associée ainsi que du dispositif de simulation du dégagement thermique par injection d'hélium sera effectuée.

Les résultats obtenus pourront alors être confrontés à ceux obtenus avec le code SYLVIA.



*Figure 6 : Visualisation d'une situation de perte de confinement au niveau d'une fuite sur une installation soumise à un vent de 35 m/s - Approche isotherme (Thèse Le Roux, 2011)*



---

## Méthodes numériques pour le traitement des données nucléaires

<b>Doctorant :</b>	<b>Ghislain FERRAN</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-EXP/SNC/LNR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Corps des Ponts, Eaux et Forêts</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Michel Gonin – École Polytechnique</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Wim Haeck</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>École Doctorale de l'X</b>

---

Les calculs de neutronique, réalisés dans les domaines de la sûreté-criticité ou de la physique des réacteurs, nécessitent de disposer des sections efficaces des matériaux mis en jeu ; les sections efficaces décrivent en effet les interactions subies par un neutron dans le matériau donné, en fonction de l'énergie du neutron. Les sections efficaces des matériaux sont établies à partir des données nucléaires des matériaux qui sont regroupées dans des bibliothèques standardisées. Cependant, les valeurs contenues dans ces bibliothèques correspondent à des matériaux à la température du zéro absolu et ne sont donc pas utilisables en l'état. Il est nécessaire d'effectuer un traitement numérique de ces bibliothèques avant d'obtenir des sections efficaces utilisables par les codes de calcul de neutronique.

Des logiciels existent pour faire ce traitement, comme NJOY. Ils ont l'inconvénient d'être très dépendants du format actuel des bibliothèques, qui est en passe d'être changé, et ont des licences d'utilisation de plus en plus restrictives. Cela a amené l'IRSN à vouloir se doter de son propre code de traitement des données nucléaires, le logiciel GAIA, avec plusieurs objectifs, outre celui de disposer d'un outil souple, adaptable pour les besoins futurs et indépendant du format des librairies. Premièrement maîtriser les différentes étapes du traitement afin de pouvoir étudier leur impact sur la précision des sections obtenues. Deuxièmement développer des méthodes numériques originales garantissant un traitement indépendant de celui effectué par les codes existants pour avoir un point de comparaison avec leurs résultats.

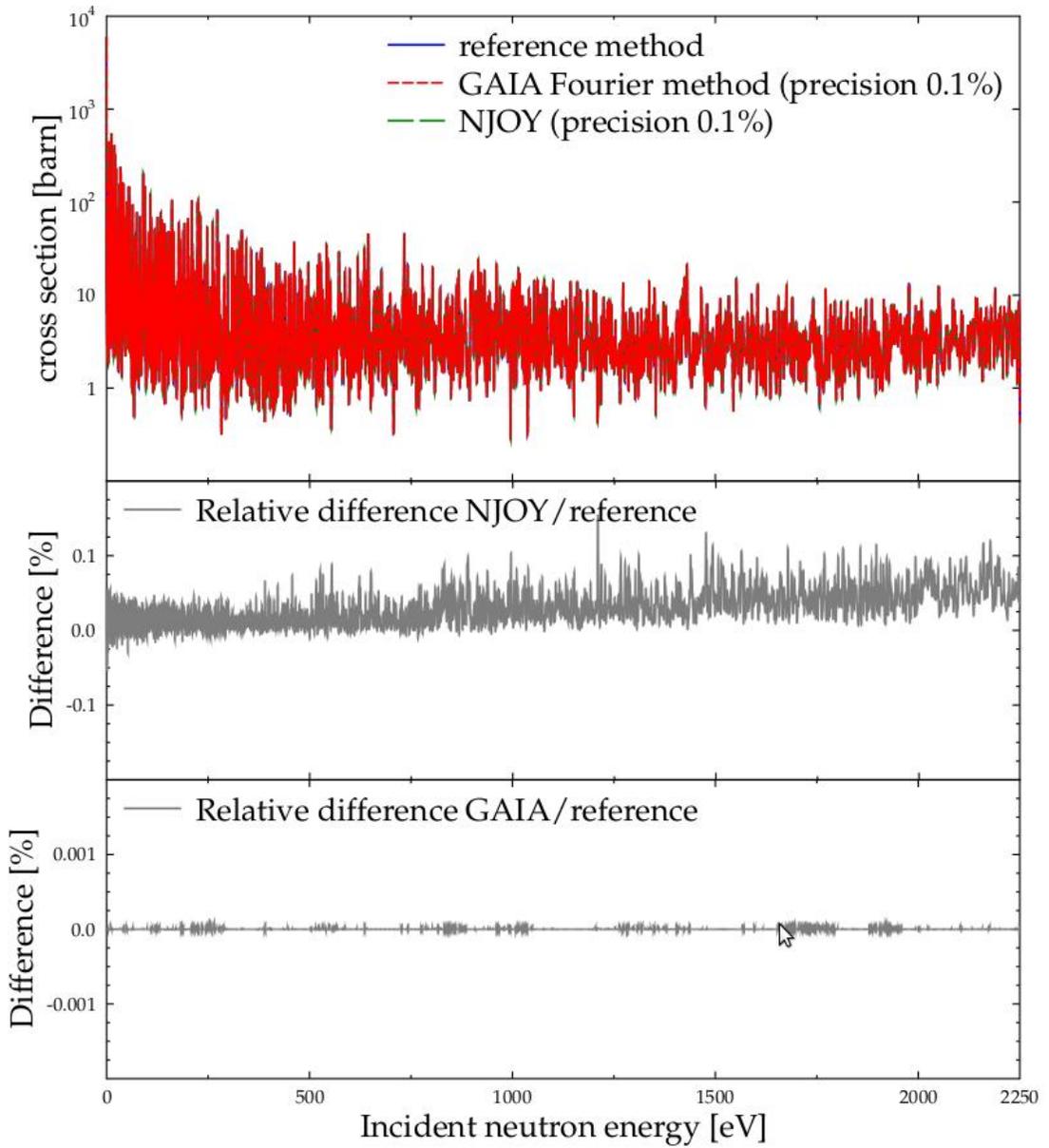
Durant cette thèse, nous nous sommes concentrés sur les méthodes numériques nécessaires à la production des sections efficaces pour les codes de calcul à énergie continue et à leur implémentation dans le logiciel GAIA.

La première étape consiste en la reconstruction des sections pour un matériel à 0 K. Les tests comparant nos résultats à ceux de NJOY montrent un accord très satisfaisant.

La seconde étape consiste à calculer l'effet Doppler pour un matériel à température non nulle. Pour cela nous avons développé une nouvelle méthodologie basée sur les transformées de Fourier. Nos tests suggèrent que cette méthode permet d'obtenir des résultats plus précis que NJOY en un temps comparable (cf. figure 1).

Enfin, la dernière étape consiste à construire une grille d'énergie suffisamment fine pour permettre le calcul des sections efficaces par interpolation linéaire.

Le travail réalisé durant cette thèse nous a donc permis de produire les fichiers d'entrée voulus et de les tester sur des configurations intégrales, avec des résultats tout-à-fait satisfaisants.



*Fig 1: section efficace de capture de U 235 à 293,6 K calculée avec NJOY et GAIA.*



## **Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

### ***Salle Le Forum***

*Président de session : F. PAQUET*

#### **13h45 Session Radioprotection « Radiotoxicologie »**

S. ZHIVIN Etude épidémiologique des travailleurs du cycle du combustible nucléaire et analyse des effets sanitaires des composés uranifères en fonction de leur solubilité

M. LEGRAND Une contamination interne chronique à l'uranium modifie-t-elle le processus de la neurogenèse au cours du développement et à l'âge adulte chez le rat ?

A. LE GUERNIC Impact de la contamination pluri-métallique à tendance uranifère sur le milieu aquatique et conséquences sur les réponses immunitaires et les capacités adaptatives du poisson

S. MUSILLI Étude des mécanismes d'action du Strontium 90 sur le système immunitaire à la suite d'une contamination chronique



Journées des thèses IRSN 2014

---

## **Etude épidémiologique des travailleurs du cycle du combustible du nucléaire et analyse des effets sanitaires des composés uranifères en fonction de leur solubilité**

<b>Doctorant :</b>	<b>Zhivin Sergey</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>04/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SRBE/LEPID</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Région Ile-de-France</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Dominique Laurier - IRSN</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Dominique Laurier</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Paris Sud XI / ED420 : Ecole doctorale de santé publique</b>

---

Les effets à long terme sur la santé d'une exposition à l'uranium sont encore débattus, bien que des données récentes suggèrent une association entre le cancer et les maladies cardiovasculaires et les caractéristiques physico-chimique de l'uranium. Cette thèse étudie les effets sanitaires (pathologies cardiovasculaires et cancéreuses) après contamination interne à l'uranium chez les travailleurs français du cycle du combustible nucléaire.

Dans le premier temps, nous avons effectué une revue critique des études épidémiologiques réalisant un suivi de populations civiles et militaires exposées à différents types des composés uranifères (Zhivin et coll., soumis à *International Journal of Radiation Biology*). Notre revue montre que les caractéristiques physico-chimiques de l'uranium sont rarement prises en compte dans les études épidémiologique et les résultats disponibles ne sont pas concluants quant à leur association avec des effets sanitaires. De plus, la majorité des travailleurs d'uranium sont exposé à plusieurs composés uranifères, ceci complique l'analyse des risques associés à chacun des types d'uranium. Cette revue nous a amené à concentrer la thèse sur deux axes de travail.

Le premier axe porte sur l'analyse du risque de décès par pathologies cardiovasculaires suite à l'exposition à l'uranium dans l'étude cas-témoins nichée des travailleurs d'AREVA NC Pierrelatte (111 cas et 284 témoins). La dose interne absorbée à l'uranium sera utilisée dans nos analyses statistiques. Notre approche originale (collaboration avec PRP-HOM/SDI/LEDI) permettra de prendre en compte la solubilité d'uranium, un des paramètres les plus importants dans l'estimation rétrospective des doses internes.

Le deuxième axe de la thèse porte sur le risque de mortalité par maladies cancéreuses et non-cancéreuses chez les travailleurs français de l'enrichissement d'uranium. Cette population est exposée à l'uranium soluble ( $UF_6$ ,  $UO_2F_2$ ), contrairement aux autres travailleurs du cycle du combustible du nucléaire. Cette étude permettra de mieux comprendre les risques spécifiquement associés à l'exposition à l'uranium soluble.

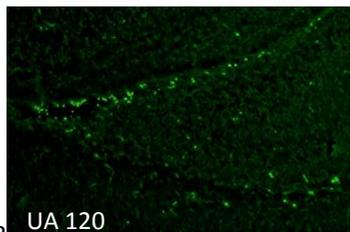


Journées des thèses IRSN 2014

## Une contamination interne chronique à l'uranium appauvri modifie-t-elle le processus de neurogenèse au cours du développement cérébral et à l'âge adulte chez le rat ?

**Doctorant :** Marie Legrand  
**Date du début de la thèse :** 03/10/2012  
**Laboratoire :** PRP-HOM/SRBE/LRTOX  
**Financement de thèse :** TAF  
**Directeur de thèse :** Per Eriksson – Uppsala University  
**Tuteur de thèse :** Céline Dinocourt  
**Ecole doctorale** Université Paris-Sud,  
**ED 425 : Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué**

L'uranium (U) est un radionucléide naturellement présent dans l'environnement. Ses nombreuses utilisations dans le cycle électronucléaire ou à des fins militaires soulèvent des questions concernant les risques pour la santé humaine. Plusieurs études démontrent des effets de l'U sur les fonctions cognitives. L'objectif de cette thèse est d'étudier l'implication de la neurogenèse en tant que possible mécanisme d'action pouvant expliquer ces perturbations cognitives.



La neurogenèse sera étudiée chez des animaux contaminés à l'uranium appauvri (UA 40 et 120mg/L) dès le stade *in utero* pendant le développement cérébral au cours duquel elle permet la formation du système nerveux et à l'âge adulte pendant lequel la neurogenèse est à la base des capacités de plasticité du SNC. Les résultats de cette partie nous permettront d'orienter des études mécanistiques des effets de l'U sur la neurogenèse à l'aide de modèles *in vitro*.

La première partie de mon projet était d'étudier à plusieurs stades embryonnaires (E) et post-nataux (P) :

- 1) la morphologie structurale du SNC par coloration au crésyl violet
- 2) la prolifération cellulaire par le marquage BrdU
- 3) la mort cellulaire par les techniques TUNEL et Fluorojade

Nos résultats montrent que l'UA n'induirait pas de trouble majeur d'organogenèse du cerveau à tous les stades étudiés. Nous observons une diminution de la surface marquée au BrdU dans le cortex des embryons E13 contaminés à l'UA120mg/L, sans modification du processus de mort cellulaire. A l'opposé, une augmentation de la surface marquée au BrdU est observée dans la zone ventriculaire du cortex et de l'hippocampe à E18, ainsi qu'une diminution du nombre de cellules marquées au fluorojade pour les embryons contaminés à l'UA 120mg/L. Les résultats montrent aussi une augmentation du nombre de cellules fluorojade positives dans le gyrus denté des rats nouveaux nés contaminés *in utero* à 120mg/L. Enfin, nous observons une diminution significative du nombre de



cellules BrdU positives dans le gyrus denté de l'hippocampe des animaux P21 contaminés à l'UA120mg/L.

En conclusion, ces résultats suggèrent fortement qu'une contamination chronique à l'UA induirait des modifications dans le processus de prolifération et de mort cellulaire au cours du développement cérébral. Pour compléter ces résultats, la différenciation neuronale sera analysée par l'étude de l'expression génique et par différents marqueurs spécifiques en immunohistochimie.

---

## **Impact de la contamination pluri-métallique à tendance uranifère sur le milieu aquatique et conséquences sur les réponses immunitaires et adaptatives des poissons**

<b>Doctorant :</b>	<b>Antoine Le Guernic</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>29/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV/SERIS/LECO</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / INERIS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Stéphane Betoulle - URCA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Béatrice Gagnaire (IRSN) et Wilfried Sanchez (INERIS)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Reims Champagne-Ardenne / Sciences Technologie Santé</b>

---

Les activités minières du 20<sup>ème</sup> siècle ont engendré un relargage massif de l'uranium dans l'environnement. En effet, bien que les minerais soient évacués pour l'activité nucléaire, les résidus et stériles ramenés en surface au niveau des sites miniers constituent une cause importante de contamination uranifère. En plus de cette contamination, d'autres métaux lourds, naturellement présents (Fe, Mn, etc.) ou d'origine anthropique (Ba, Al) viennent augmenter la pollution de l'écosystème, dont le compartiment aquatique, dernier refuge des métaux lourds. Ceci constitue donc un risque pour la faune aquatique. Les conséquences de cette contamination polymétallique peuvent être observées au travers de réponses métaboliques et physiologiques, les biomarqueurs. Certains biomarqueurs revêtent un fort intérêt pour évaluer les effets de cette contamination : les marqueurs d'immunotoxicité, de défenses anti-oxydantes et de génotoxicité.

La thèse a pour objectifs : i) d'étudier les effets d'une contamination multi-métallique sur l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*) et ii) d'observer les capacités d'adaptation des poissons suite à une combinaison de stress.

Afin de répondre au premier objectif, six étangs situés dans deux sites (Cantal et Haute-Vienne) ont été choisis en fonction de leur proximité avec d'anciennes mines d'extraction d'uranium et de leur niveau de contamination métallique, liée aux traitements chimiques associés à l'extraction. 240 épinoches ont été encagées sur ces sites. Une batterie de biomarqueurs a été mesurée sur les poissons échantillonnés, 14 et 28 jours après encagement. Les résultats d'ACP montrent une synergie entre la contamination métallique et la bioaccumulation dans différents organes, une immunostimulation ou immunosuppression, une augmentation de la génotoxicité au bout de 14 jours et une activité de l'AcHE plus importante, chez les organismes encagés dans les étangs contaminés. Enfin, un effet temps, dû à la variation de température ou à l'encagement, est visible pour les activités anti-oxydantes et pour quelques paramètres immunitaires (intégrité de la membrane lysosomale, pourcentage de lymphocytes).

Afin d'étudier la réponse des poissons à un stress combiné (chimique + biologique) (objectif ii), une deuxième manipulation est envisagée en avril 2014. Cette expérience consistera en une injection de lipopolysaccharides pendant l'encagement des poissons, afin de stimuler la réponse immunitaire et d'évaluer le rôle d'une contamination multi-métallique en termes de mortalité et d'état physiologique.

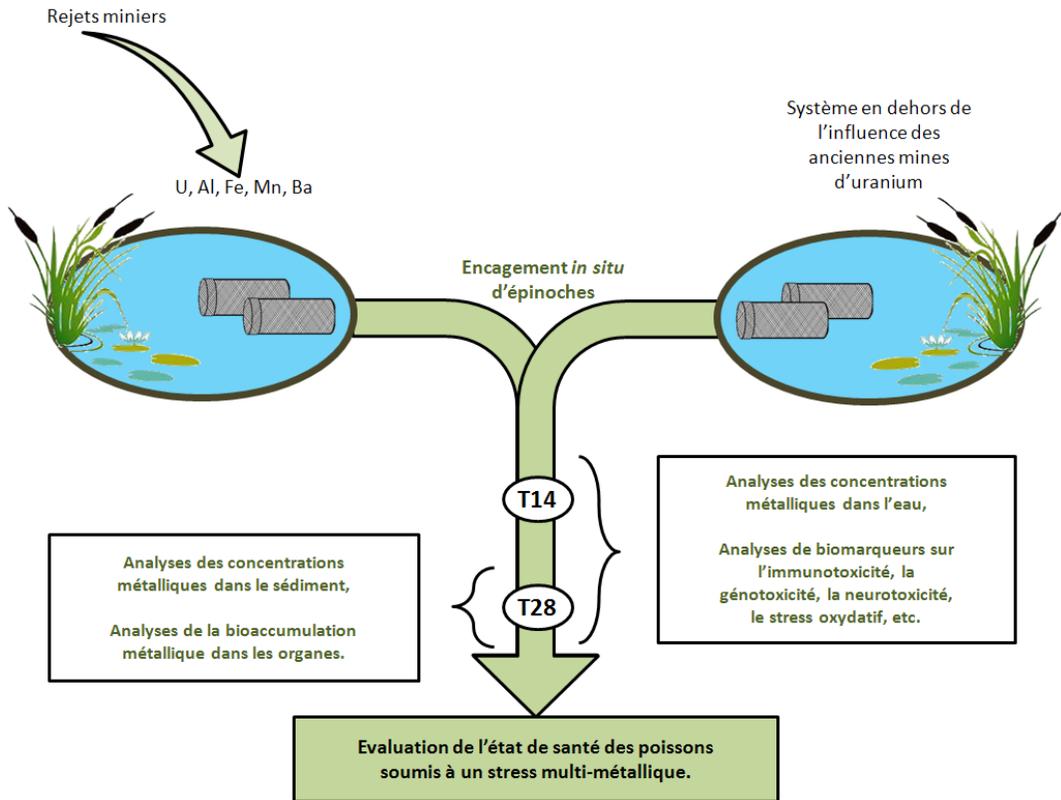


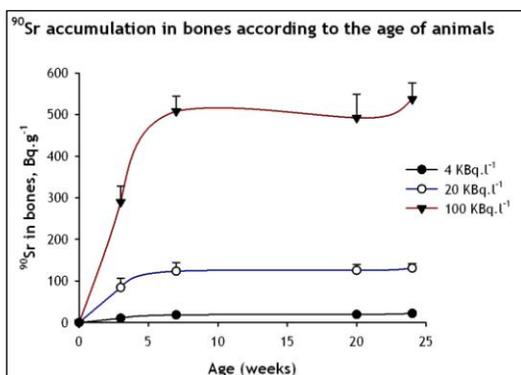
Figure 1 : Schéma simplifié du protocole de la première expérience *in situ*.

## Etude des mécanismes d'action du $^{90}\text{Sr}$ sur le système immunitaire à la suite d'une contamination chronique

Docteurant :	Stefania MUSILLI
Date du début de la thèse :	01/10/2012
Laboratoire :	PRP-HOM/SRBE/LRTOX
Financement de thèse :	TAF
Directeur de thèse :	Jean-Marc Bertho-IRSN Saadia Kerdine-Römer-Université Paris Sud
Tuteur de thèse :	Jean-Marc Bertho
Ecole doctorale :	Paris XI/ ED425 Innovation Thérapeutique

A la suite des accidents nucléaires (Tchernobyl en 1986 ou plus récemment Fukushima en 2011) le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{90}\text{Sr}$  font partie des nombreux éléments rejetés dans l'environnement. La contamination à long terme des populations vivant sur les territoires contaminés se fait essentiellement par ingestion chronique de ces deux éléments. En effet, leur longue demi-vie fait qu'ils sont des éléments persistants dans l'environnement. Aujourd'hui encore, les populations de ces territoires ingèrent quotidiennement de faibles quantités de ces radioéléments. Cependant, les effets sanitaires de cette ingestion à faible niveau sont encore mal connus. Les études antérieures du laboratoire ont montré que le  $^{90}\text{Sr}$  s'accumule préférentiellement dans l'os et qu'il a un effet sur le système immunitaire et sur la physiologie osseuse.

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier les mécanismes d'action du  $^{90}\text{Sr}$  dans l'os afin de comprendre les modifications fonctionnelles précédemment observées. L'hypothèse envisagée est que le rayonnement  $\beta^-$  émis lors de la désintégration du  $^{90}\text{Sr}$  agirait sur les cellules à proximité du tissu osseux : les cellules souches hématopoïétiques (HSC) et/ou mésenchymateuses (MSC).



Pour vérifier cette hypothèse, 2 modèles sont utilisés. Le premier est un modèle *in vivo* de dose-réponse avec des concentrations de  $^{90}\text{Sr}$  dans l'eau de boisson de 0, 4, 20 et 100 KBq/l et un suivi des animaux de 24 semaines. L'analyse de cette étude est actuellement en cours et va nous permettre de définir l'amplitude et la spécificité des effets du  $^{90}\text{Sr}$  sur le système immunitaire et osseux, mais également de déterminer l'existence d'une dose-réponse.

Le deuxième est un modèle *in vitro*, dans lequel une lignée de cellules stromales murines MS5 est contaminée par du  $^{90}\text{Sr}$  à 1 ou 10 KBq/ml dans le milieu de culture. Des tests de prolifération cellulaire (test CFU-F) et de mise en évidence de dommages à l'ADN ont été réalisés. Les premiers résultats indiquent que le  $^{90}\text{Sr}$  induit une modification de la prolifération cellulaire qui s'accompagne de l'apparition de cassures double brin



dans l'ADN. En parallèle des tests de différenciation cellulaire mais également d'analyse du cycle cellulaire et du niveau de stress oxydant en réponse à la contamination sont actuellement menés pour répondre à l'hypothèse de travail.



## **Mardi 1<sup>er</sup> avril 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : B. CHAUMONT*

#### **16h15 Sessions plénières Sécurité « Matériaux » et « Incendie »**

N. BAUDIN Évaluation du transfert de chaleur en ébullition en film transitoire.

K. VARRAL Étude de l'écoulement de convection mixte d'un gaz à densité variable à travers une ouverture horizontale reliant deux compartiments superposés et mécaniquement ventilés - Application à la propagation verticale des fumées d'incendie dans des configurations multi-locaux.

A. KACEM Modélisation numérique de la pyrolyse en atmosphère normalement oxygénée et sous-oxygénée



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Étude expérimentale de l'ébullition transitoire

<b>Doctorant :</b>	<b>Nicolas Baudin</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>22/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SEMIA/LIMAR</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancement EDF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Catherine Colin, Julien Sebilleau – IMFT (Toulouse)</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Pierre Ruyer</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université de Toulouse, Mécanique Énergétique Génie civile et Procédés</b>

---

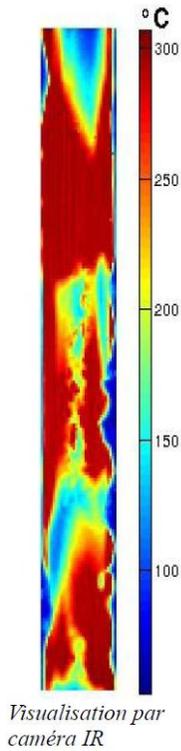
L'accident d'insertion de réactivité (RIA) est étudié pour le dimensionnement des réacteurs nucléaires. Il correspond à une augmentation soudaine et importante de la température du combustible nucléaire ( $\sim 1000\text{K/s}$  pendant quelques millisecondes). L'étude du refroidissement du combustible entouré par un écoulement d'eau est importante pour évaluer les conséquences de cet accident : si la température augmente trop, les gaines contenant le combustible peuvent casser et libérer des particules radioactives. La modélisation de l'ébullition transitoire de l'eau à la paroi chauffée est importante mais reste méconnue. L'IRSN mène un programme de recherche à ce sujet et une boucle expérimentale dédiée a été construite à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse pour comprendre l'effet d'un chauffage transitoire sur l'ébullition. Une conduite de section semi-annulaire est équipée d'une caméra infrarouge pour mesurer la température de paroi avec une grande précision temporelle et une caméra rapide pour voir le développement de l'ébullition. La paroi est chauffée par effet Joule.

Quand la paroi commence à chauffer les transferts de chaleur se font par convection forcée instationnaire (phase 1). Passée une température de paroi  $T_{\text{onb}}$ , le fluide passe en ébullition nucléée (phase 2). Quand une température critique  $T_{\text{CHF}}$  est atteinte, les bulles coalescent et forment un film de vapeur qui isole la paroi du fluide et la température augmente rapidement (phase 3). Quand le chauffage est arrêté, la température diminue et le système repasse par les mêmes pour ramener la paroi à sa température initiale (phases 5 et 6). La redescente à une température normale peut être 4 à 5 fois plus longue que le temps de chauffe. Pendant l'ébullition en film la température est très élevée et la paroi peut casser.

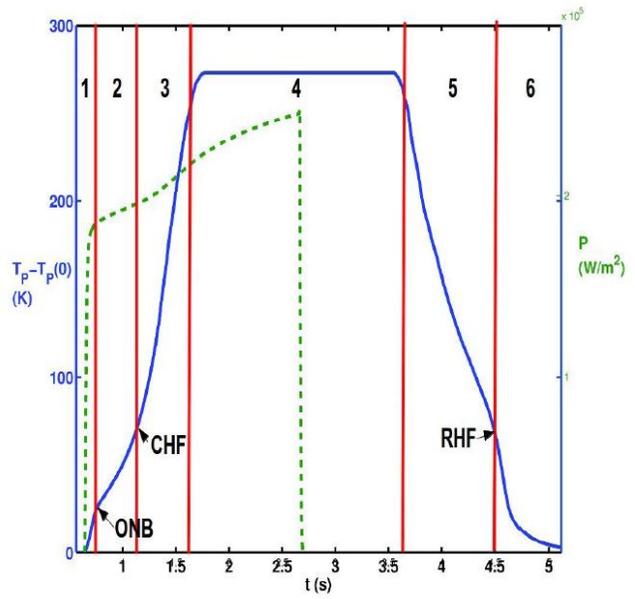
La thèse a pour but de modéliser cet ensemble de phases représentatives d'un accident RIA. La caractérisation de la phase 1 a permis de faire un modèle pour expliquer l'augmentation de  $T_{\text{ONB}}$  avec la vitesse de montée en température. Les transferts de chaleur en ébullition et  $T_{\text{CHF}}$  augmentent aussi avec la vitesse de chauffe. La redescente en température en ébullition en film peut être bien représentée par un modèle dit « deux fluides ».



Visualisation par caméra rapide



Visualisation par caméra IR



Evolution de la température et de la puissance au cours d'un essai type RIA

---

## Écoulements de fumée à travers un orifice horizontal reliant deux compartiments ventilés mécaniquement

**Docteurant :** Kevin VARRALL  
**Date du début de la thèse :** 01/10/2012  
**Laboratoire :** PSN-RES/SA21/LEF  
**Financement de thèse :** IRSN  
**Directeur de thèse :** Olivier VAUQUELIN, Université Aix-Marseille, Laboratoire IUSTI  
**Tuteur de thèse :** Hugues PRETREL (PSN-RES/SA21/LEF)  
Samuel VAUX (PSN-RES/SA21/LIE)  
**Ecole doctorale :** ED 353 Science pour l'ingénieur  
Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique

---

La thèse concerne la propagation des fumées d'incendie dans une installation nucléaire constituée de locaux interconnectés entre eux par des ouvertures et mécaniquement ventilés. L'écoulement étudié est celui à travers une ouverture à section horizontale (trémie) reliant deux enceintes situées l'une au-dessus de l'autre. L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation de cet écoulement permettant aux outils numériques de l'IRSN de pouvoir en évaluer l'impact sur la sûreté des installations.

La première année de thèse a été consacrée à l'étude bibliographique et à l'approche analytique des écoulements. Les travaux de Epstein (1988), Epstein et Kenton (1989) et Tan et Jaluria (1992) traitant la configuration instable où la densité des gaz du local inférieur est plus faible que celle des gaz du local supérieur, montrent l'existence de plusieurs régimes d'échange. Ces régimes sont liés aux caractéristiques géométriques de la trémie (rapport L/D) ainsi qu'à celles de la ventilation (à travers une différence de pression  $\Delta P$  à la trémie) et de la chaleur des gaz (différence de masse volumique  $\rho$ ). Des essais (Le Quesne 2010) et des analyses (Liberati 2012) récents ont montrés l'insuffisance des modèles actuels (Cooper 1989 et 1994) pour la prédiction (avec les codes à zones), des risques associés à ce type de propagation de fumée.

La seconde partie s'est concentrée sur l'élaboration d'une approche analytique découplant les phénomènes physiques (diffusion et convection massiques et les transferts thermiques). Un programme d'expérimentations à échelle réduite impliquant deux liquides non miscibles (eau/essence) de différentes densités a été entrepris dans le but d'identifier les régimes d'écoulements (mono ou bi-directionnel, stationnaire ou pulsé) et d'en caractériser le comportement. Les débits d'échanges sont mesurés en observant l'évolution de l'interface entre les deux fluides. Les résultats obtenus en convection naturelle sont comparables avec ceux disponibles dans la littérature pour des régimes où le temps de diffusion est très petit devant le temps de vidange (cf. fig 1).

Parallèlement à cette campagne expérimentale, le phénomène de poinçonnement est étudié de façon théorique par le biais des écoulements potentiels. Cette étude traite du cas où une extraction mécanique aspire à travers une trémie une couche de fumée en mouvement longitudinal (soufflage en tunnel, « ceiling jet »).

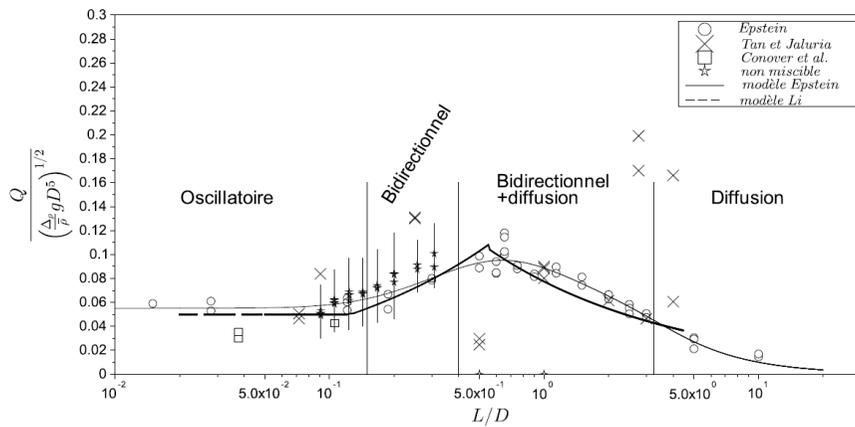


Figure 1 : Débit volumiques à travers la trémie en fonction du rapport L/D - Comparaison des résultats expérimentaux (étoile) avec les données de la littérature.

---

## Modélisation numérique de la pyrolyse en atmosphère normalement oxygénée et sous-oxygénée

<b>Doctorant :</b>	<b>Ahmed KACEM</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>07/09/1988</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SA2I/LIE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/région PACA</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Bernard PORTERIE - IUSTI</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Sylvain SUARD</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Aix-Marseille</b>
<b>ED353 : Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique</b>	

---

Les incendies font partie des risques majeurs des installations nucléaires et industrielles. Ainsi, pour prévenir ces risques et évaluer leurs conséquences sur l'installation et l'environnement, la simulation numérique se présente comme un moyen potentiellement performant et peu coûteux.

Actuellement, une des principales difficultés pour réaliser une simulation dite prédictive est de quantifier le terme source de l'incendie, à partir de la connaissance des matériaux combustibles et de l'environnement. Il s'agit en particulier de déterminer la perte de masse du combustible ainsi que les conditions d'allumage et d'extinction du feu en fonction du milieu environnant. Cette perte de masse, appelée également taux de pyrolyse, est le paramètre primordial permettant de déterminer l'évolution de la puissance du feu au cours du temps et ses conséquences sur l'installation.

Le combustible considéré lors de ce travail de recherche est un polymère, le PMMA (polyméthacrylate de méthyle), utilisé dans l'industrie (boîtes à gants dans le domaine nucléaire) et dans les études académiques portant sur la sécurité incendie. Un des objectifs est donc de correctement simuler les phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu dans les phases gazeuse et solide tout en considérant le couplage de ces deux phases. La modélisation doit, pour cela, être suffisamment exhaustive afin de représenter finement la turbulence de l'écoulement, la combustion en phase gazeuse avec production de suies ainsi que les transferts radiatifs et la dégradation de la phase condensée.

Dans le cadre de cette étude, un modèle de pyrolyse prenant en compte la dégradation thermique dans la profondeur du solide ainsi que le caractère semi-transparent du PMMA a été implémenté et validé dans le code CFD ISIS de l'IRSN. Les paramètres nécessaires au calibrage du modèle sont déterminés à l'aide d'un algorithme génétique. A terme, les installations nucléaires étant généralement considérées comme des milieux très fortement confinés et sous-oxygénés, l'effet de la sous-oxygénation sur l'évolution du terme source de l'incendie sera étudié. Dans cette configuration, la viciation de l'air est un paramètre important car celui-ci influe sur les réactions en phase gazeuse et la production de suie et par conséquent sur le taux de pyrolyse du combustible.

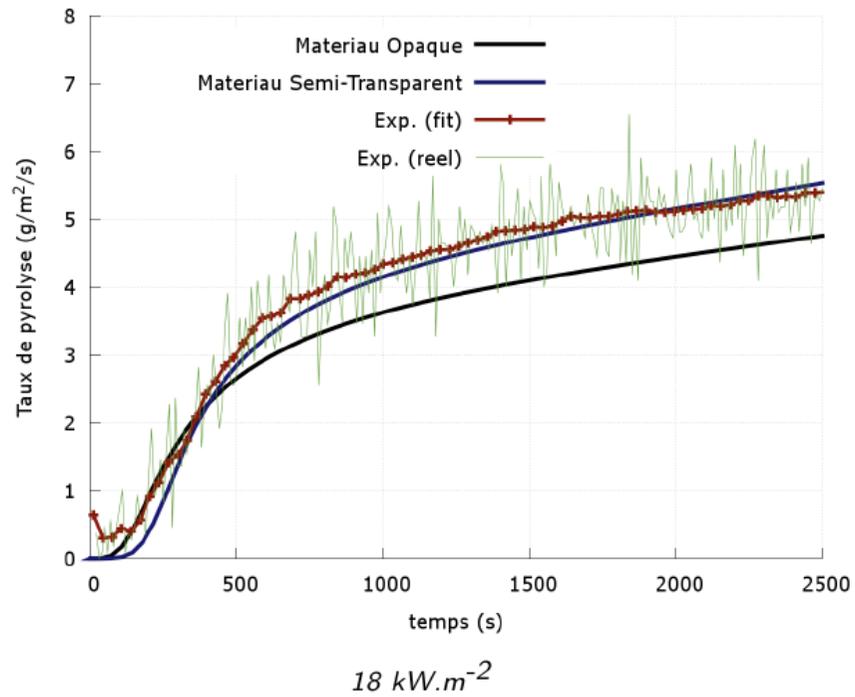


Figure 7. Taux de pyrolyse d'une plaque de PMMA en fonction du temps



## **Mercredi 2 avril 2014**

*Salle Le Loft*

*Président de session : G. NAHAS*

### **9h Sessions plénières Sûreté « Incendie » et « Matériaux »**

D. BOUFFLERS Étude des mécanismes de formation des précurseurs de suies dans des flammes de méthane pré-mélangées dopées à différentes richesses

A HILAIRE Étude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune au long terme. Application aux enceintes de confinement.

L. AMARSID Fragmentation et écoulement des agrégats poreux



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Étude expérimentale et modélisation de la formation des suies et de leurs précurseurs dans des flammes de prémélanges à différentes richesses (cas du n-butane)

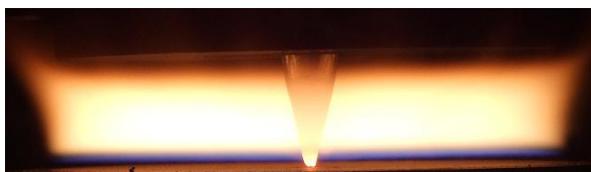
Doctorant :	Damien BOUFFLERS
Date du début de la thèse :	21/11/2011
Laboratoire :	UMR CNRS/Université (UMR 8522)/PC2A
Financement de thèse :	IRSN
Directeur de thèse :	Abderrahman EL BAKALI-PC2A
Tuteur de thèse :	Laurence RIGOLLET
Ecole doctorale :	Université Lille 1/Ecole Doctorale-104

**Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'environnement**

---

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans une problématique d'incendie dans une installation nucléaire. La vitesse de propagation de l'incendie ainsi que l'agression thermique de l'environnement sont directement liées aux propriétés radiatives de la flamme, elles-mêmes dépendantes de la quantité de suies produites lors de la combustion. Or, les mécanismes de production des suies sont encore mal connus. Afin d'améliorer la prédiction de la quantité de suies dans les codes de calcul d'incendie, il est nécessaire de disposer au préalable d'un mécanisme chimique détaillé capable de rendre compte de la formation des précurseurs de suies, constitués notamment par les hydrocarbures poly-aromatiques (HAP) et ce, pour différentes proportions de mélange combustible/comburant.

Pour cela, la structure chimique d'une flamme plate de prémélange suitée,  $n\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{O}_2/\text{N}_2$  stabilisée à deux richesses ( $\Phi=2.16$   $\Phi=2.32$ ) et à pression atmosphérique, a été déterminée au moyen d'un système d'échantillonnage par microsonde en quartz couplé avec des techniques d'analyse par CPG et IRTF. Cela a conduit à la détermination de la fraction molaire des réactifs et des produits, ainsi que la fraction molaire des hydrocarbures C1 jusqu'à C7 (du méthane au toluène), en prélevant les espèces chimiques le long de l'axe de la flamme.



*Flamme plate de prémélange atmosphérique de n-butane  $\Phi=2.16$*

Les données expérimentales obtenues ont révélé que les espèces oléfiniques étaient insensibles à la variation de richesse dans nos conditions d'études alors que les alcynes en C3 et C4, considérés comme des précurseurs des radicaux propargyls, ont une augmentation de leurs maximum de fraction molaire du même ordre de grandeur que celle du benzène et du toluène. Cette observation suggère une prédominance d'une auto-recombinaison du radical propargyl dans la formation du premier cycle aromatique.



Les mesures des profils de température réalisés par Fluorescence Induite par Laser du monoxyde d'azote ont permis de compléter le travail de modélisation en cours. La modélisation devrait fournir des informations quantitatives précises sur le processus cinétique postulé en particulier pour le benzène.

Enfin, le mécanisme développé sera ensuite utilisé avec un code de suie basé sur la méthode des moments et permettra ainsi de tester sa capacité à prédire les profils de fraction volumique de suie qui ont été obtenus par Incandescence Induite par Laser.

---

## **Étude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune au long terme**

### **Application aux enceintes de confinement**

<b>Doctorant :</b>	<b>Hilaire Adrien</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>Laboratoire de Mécanique et Technologie – UMR CNRS 8535 – ENS Cachan et IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Collaboration IRSN-ENS Cachan</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yves Berthaud</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Georges Nahas</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ENS Cachan</b>

---

L'enceinte de confinement est la troisième et la dernière barrière de confinement contre le relâchement éventuel de produits radioactifs dans l'environnement. Tout projet de prolongation de la durée d'exploitation du réacteur nucléaire ne peut passer que par le maintien des capacités de confinement de cette structure dans le temps. Cette thèse a pour but de donner les outils nécessaires à la modélisation d'une enceinte de confinement depuis sa fabrication jusqu'à la fin de sa mise en service.

L'étude du comportement de cette structure est décomposée en deux phases distinctes. La première partie de ce travail porte sur le comportement au jeune âge. Durant les premières semaines après la fabrication de la structure, des contraintes thermo-mécaniques apparaissent dans le béton. Elles sont le résultat de la restreinte des déformations thermiques induite par la nature exothermique de la réaction d'hydratation du ciment (notamment au niveau des reprises de bétonnage entre différentes levées). Ces contraintes peuvent générer de la fissuration et affaiblir les propriétés de confinement de l'enceinte. A l'issue de cette phase, cette structure est bi-axialement précontrainte (horizontalement et verticalement). Le niveau de précontrainte décroît tout au long de la vie de l'ouvrage. En effet, à long terme, les déformations différées, dues aux phénomènes de retrait et du fluage du béton, induisent des pertes de précontraintes dans les câbles. L'évolution dans le temps du comportement mécanique de l'enceinte interne et de sa capacité de confinement en cas d'accident est alors réduite.

De plus, pour évaluer la stabilité et la capacité de confinement des enceintes, des épreuves décennales sont réalisées périodiquement (application d'une surpression interne de 0,4 MPa en air et à température ambiante) Pendant ces épreuves quelques fissurations sont parfois observées dans certaines parties singulières de la structure.

Le travail de la 1<sup>ère</sup> année a été consacré à l'étude bibliographique sur les modèles numériques utilisés pour la simulation du fluage du béton et la compilation des résultats expérimentaux des thèses de l'IRSN sur le béton B11. Un programme expérimental a été établi avec une mise au point d'essai de fluage sous sollicitations biaxiales.

Durant la seconde année, le travail de recherche consistait à la mise en œuvre du modèle numérique dans le logiciel CAST3M et la réalisation du programme expérimental. Une large part des essais uniaxiaux a été réalisée et le comportement différé du béton reconstitué B11 a été identifié en



conditions endogènes et séchantes. Les essais ont permis d'identifier les paramètres nécessaires à la simulation du comportement hygro-mécanique du béton à long terme.

Durant cette dernière année, le travail est consacré à la suite du programme expérimental avec la poursuite d'essais uniaxiaux et biaxiaux. La validation du modèle numérique avec l'identification des paramètres matériaux a été en partie effectuée. Le calcul d'application sur une enceinte de confinement est en cours, cette simulation porte sur une tranche d'une partie courante de l'enceinte de confinement. La prédiction du comportement de cette structure depuis le jeune âge jusqu'à la fin de sa mise en service permettra de mettre en évidence le rôle joué par les déformations différées.



---

## Fragmentation et écoulement des agrégats poreux

<b>Doctorant :</b>	<b>Lhassan AMARSID</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>LMGC Montpellier 2</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Franck RADJAÏ – CNRS</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Frederic PREALES</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Montpellier 2 , I2S</b>

---

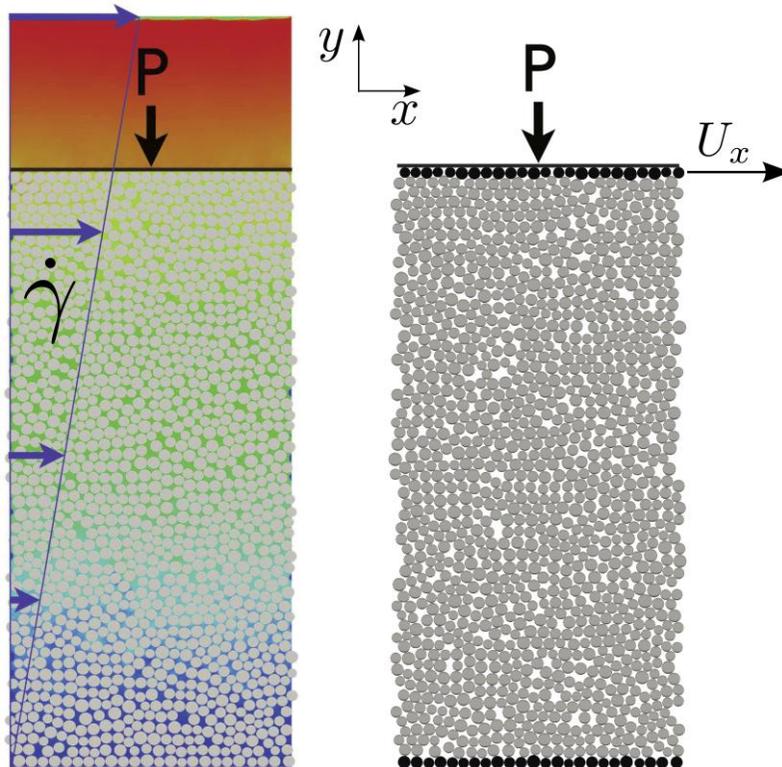
L'objectif de la thèse est l'étude et l'analyse du processus de fragmentation et relocalisation du combustible nucléaire en présence d'un fluide (gaz de fission en situation normale, ou fluide caloporteur en cas de rupture de la gaine) par modélisation numérique, en utilisant des approches discrètes par couplage des méthodes LEM (Lattice Element Method), LBM (Lattice Boltzmann Method) et DEM (Discret Element Method).

En première année, un modèle basé sur le couplage LBM-DEM a été mis en place pour analyser le comportement homogène du mélange fluide-grains dans une géométrie de Couette (cisaillement imposé). Une campagne de simulations a été menée pour déterminer les conditions d'obtention d'un mélange homogène et la dépendance des grandeurs effectives (viscosité, frottement interne, compacité) au taux de cisaillement et aux propriétés matérielles.

Les résultats obtenus ont été mis à l'échelle par le biais de deux nombres sans dimension :

- le nombre inertiel qui quantifie l'importance relative de l'inertie des grains et les contraintes de confinement de l'assemblage granulaire,
- le nombre visqueux qui quantifie les forces visqueuses exercées sur les grains par le fluide par rapport aux contraintes de confinement.

Ces études indiquent que pour une viscosité donnée, la résistance au cisaillement et la compacité du milieu granulaire dépendent uniquement du nombre inertiel. Les paramètres de ces fonctions ne dépendent que de la viscosité du fluide. Nos simulations sont en très bon accord avec des données expérimentales et des modèles théoriques récents.



à gauche : milieu granulaire confiné et soumis à un cisaillement fluide  
à droite : cisaillement simple sans fluide



## **Mercredi 2 avril 2014**

### *Salle Le Loft*

*Président de session : F. QUEINNEC*

**10h45** Conférencier invité : Eric BLANCHARDON

#### **11h15 Session plénière Radioprotection « Dosimétrie »**

A. MOIGNIER Dosimétrie cardiaque à l'aide de fantômes numériques hybrides dans le cadre de traitements par radiothérapie

C. MOIGNIER Dosimétrie des faisceaux de photons de petites dimensions utilisés en radiothérapie stéréotaxiques : détermination des données dosimétriques de base et évaluation des TPS

A. PETITGUILLAUME De la dosimétrie standard à la dosimétrie personnalisée en médecine nucléaire : prise en compte de la morphologie et de la biocinétique spécifique au patient



Journées des thèses IRSN 2014

---

## **Dosimétrie cardiovasculaire à l'aide de fantômes numériques hybrides suite à une radiothérapie**

**Doctorant :** Alexandra MOIGNIER  
**Date du début de la thèse :** 03/10/2011  
**Laboratoire :** PRP-HOM/SDI/LEDI  
**Financement de thèse :** TAF  
**Directeur de thèse :** Bernard AUBERT – IRSN/PRP-HOM/SER/UEM  
**Tuteur de thèse :** David BROGGIO (PRP-HOM/SDI/LEDI)  
et Sylvie DERREUMAUX (PRP-HOM/SER/UEM)  
**Ecole doctorale :** Université Paris-Sud XI – Ecole doctorale MIPEGE (ED 534)

---

De nombreuses études épidémiologiques ont mis en évidence la cardiotoxicité de certaines radiothérapies. L'objectif de cette thèse est donc de préciser la dosimétrie cardiovasculaire pour des radiothérapies du sein gauche et du lymphome de Hodgkin en utilisant les fantômes numériques hybrides.

A défaut de visualiser les coronaires sur les images scanner servant à la planification de traitement, certains hôpitaux les localisent par a priori anatomique. Une imagerie des coronaires serait-elle justifiée pour préciser la dosimétrie cardiovasculaire ? Pour répondre à cette question, différentes topologies de coronaires basées sur des coroscanners ont été modélisées dans un thorax féminin représentatif. Deux protocoles de radiothérapies du sein gauche ont été simulés : le premier traite la glande mammaire et le lit tumoral (TG\_LitT) ; le second traite également la chaîne mammaire interne (TG\_LitT\_CMI). Dans notre étude, la variabilité de la topologie de l'artère inter-ventriculaire antérieure induit une dispersion de la dose moyenne et de la dose minimale reçue par 2% du volume le plus irradié de respectivement 19% et 49% pour TG\_LitT, et respectivement 35% et 76% pour TG\_LitT\_CMI. Les doses maximales sont comprises entre 5.2 Gy et 26.1 Gy avec TG\_LitT et entre 20 Gy et 30 Gy avec TG\_LitT\_CMI. La cartographie 3D de la dose aux coronaires révèle que la localisation et le niveau de dose des points chauds dépendent de la balistique et de la topologie des coronaires. Des études de sensibilité de la dose cardiovasculaire à d'autres paramètres (morphologie cardiovasculaire, morphologie thoracique,...) devront s'ensuivre.

En collaboration avec l'Institut Gustave Roussy, des modèles de patients combinant leur imagerie thoracique acquise au moment de leur radiothérapie du lymphome de Hodgkin et leur imagerie cardiovasculaire acquise lors de leur suivi post-traitement ont été créés. Les dosimétries cardiovasculaires de patients présentant des atteintes coronariennes ont été comparées à celles de patients témoins. Les segments de coronaire lésés présentent des doses médianes significativement supérieures à celles des segments non lésés. Un accroissement du risque d'athérosclérose sur un segment de coronaire a été évalué à 4.9% par gray additionnel sur la dose médiane au segment (intervalle de confiance 95%, 0.4% à 9.5% ;  $p$ -value<0.05) à l'aide des dosimétries cas-témoins.

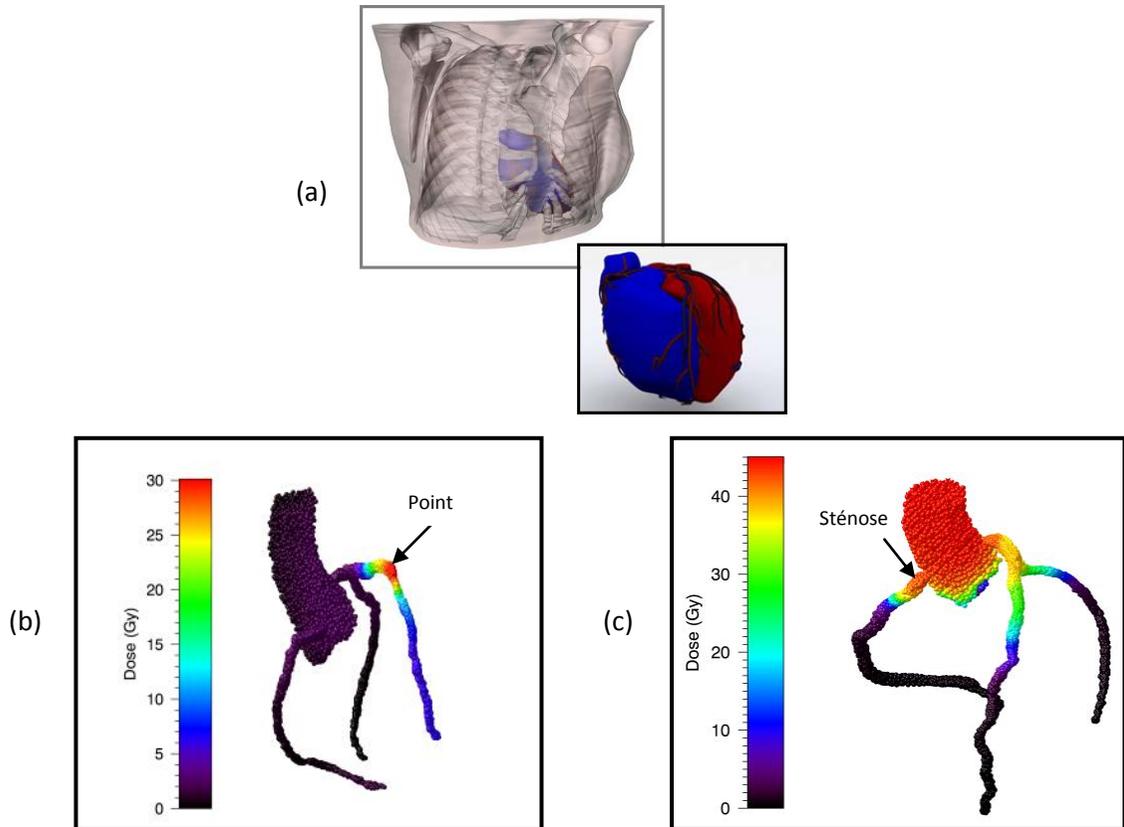


Figure :

En haut (a), un exemple de fantôme numérique hybride avec un modèle de cœur générique.

En bas, deux exemples de cartographie de dose sur l'aorte et les principales artères coronaires : (b) une cartographie de dose suite à une radiothérapie du sein gauche avec localisation du point chaud ; (c) une cartographie de dose suite au traitement du lymphome de Hodgkin avec localisation de l'atteinte coronarienne.

---

## **Dosimétrie des faisceaux de photons de petites dimensions utilisés en radiothérapie stéréotaxique : détermination des données dosimétriques de base et évaluation des systèmes de planification de traitement.**

<b>Doctorant :</b>	<b>Cyril MOIGNIER</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SDE/LDRI</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Libor MAKOVICKA</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christelle HUET</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Paris Sud 11 - MIPEGE</b>

---

L'IRSN développe depuis quelques années un projet de recherche sur la dosimétrie des mini-faisceaux de photons utilisés en radiothérapie externe. Ces faisceaux de petites dimensions sont caractérisés par de forts gradients de dose et un manque d'équilibre électronique latéral, rendant les techniques dosimétriques conventionnelles inadaptées. La thèse, dont l'objectif est de permettre une meilleure évaluation de la dose délivrée aux patients traités par radiothérapie utilisant des mini-faisceaux (dite radiothérapie stéréotaxique), est articulée autour de deux axes.

Le premier axe a consisté à caractériser et développer des techniques afin de déterminer au mieux les données dosimétriques de base dans les mini-faisceaux. Pour cela deux appareils délivrant des mini-faisceaux ont été modélisés à l'aide du code de calcul Monte-Carlo (MC) PENELOPE. Différents détecteurs du commerce utilisés pour la mesure des données de base ont également été modélisés. Des données de base, en particulier les facteurs d'ouverture du collimateur, ont été calculées pour plusieurs tailles de champs et comparées aux valeurs mesurées. Il en ressort que les films radiochromiques sont performants pour ce type de mesure. Des facteurs correctifs ont été déterminés pour les détecteurs actifs. Enfin, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques propres aux mini-faisceaux et les variations de réponse des détecteurs, les effets volume, enrobage, composition et densité du volume de détection ont été étudiés.

Le second axe a consisté à évaluer les écarts entre la dose calculée par les systèmes de planification de traitement (TPS) utilisés en radiothérapie stéréotaxique et la dose réellement délivrée. Pour cela, un protocole de mesure des distributions de dose à l'aide de films radiochromiques a été développé. Celui-ci a été validé par comparaison entre les distributions de doses expérimentales et les distributions de doses calculées par le TPS ainsi que celles calculées par la modélisation MC PENELOPE dans un fantôme homogène. Enfin, des inserts os et poumons ont été utilisés pour configurer un fantôme hétérogène et des plans de traitement avec les champs de 10, 7.5 et 5 mm ont été réalisés pour différentes localisations de tumeurs (dans le poumon et à l'interface tissu/os/poumon). L'évaluation des algorithmes du TPS est actuellement en cours.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## De la dosimétrie standard à la dosimétrie personnalisée en médecine nucléaire : prise en compte de la morphologie et de la biocinétique spécifique au patient

<b>Doctorant :</b>	Alice PETITGUILLAUME
<b>Date du début de la thèse :</b>	03/10/2011
<b>Laboratoire :</b>	PRP-HOM/SDI/LEDI
<b>Financement de thèse :</b>	IRSN
<b>Directeur de thèse :</b>	Didier FRANCK - IRSN
<b>Tuteur de thèse :</b>	Aurélié DESBRÉE
<b>Ecole doctorale :</b>	Paris 11 / ED517 – Particules, Noyaux et Cosmologie

---

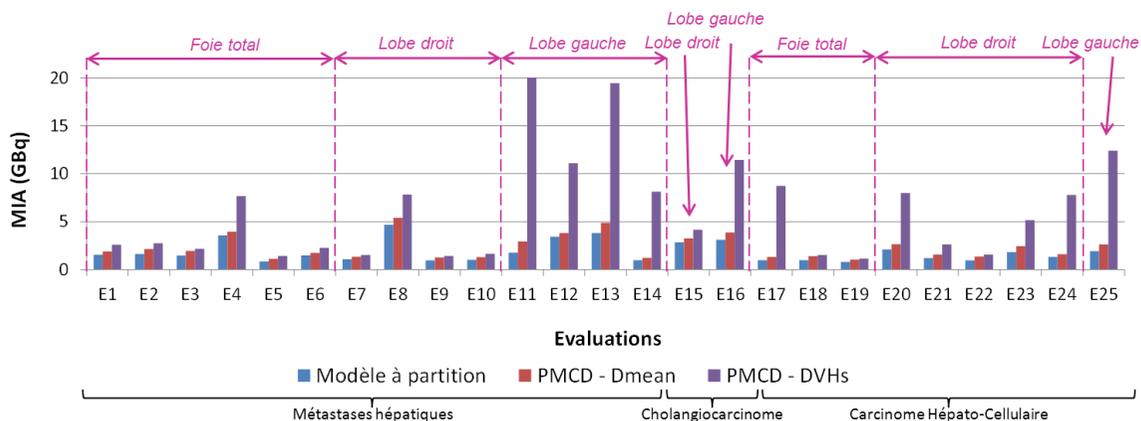
En médecine nucléaire thérapeutique, l'injection d'un radiopharmaceutique vise la destruction des cellules cancéreuses. L'activité injectée étant élevée, une dosimétrie précise et personnalisée doit être réalisée afin de garantir que les doses absorbées reçues par les organes à risque (OARs) n'entraînent pas d'effets secondaires importants. Le logiciel OEDIPE, développé au laboratoire, permet de réaliser cette dosimétrie grâce à l'association de fantômes voxelisés modélisant le corps humain, de matrices tridimensionnelles décrivant la distribution spatiale de l'activité et du code de calcul Monte-Carlo MCNPX. Il permet alors d'en déduire l'activité maximale injectable au patient (MIA) qui respecte des critères de tolérance aux OARs.

En collaboration avec l'Hôpital européen Georges Pompidou (HEGP), la méthode développée a donc été appliquée rétrospectivement à la Radiothérapie interne sélective (SIRT) qui consiste en l'injection de microsphères chargées à l' $^{90}\text{Y}$  pour le traitement de cancers hépatiques. La planification de ce traitement en clinique est réalisée actuellement avec le modèle à partition, qui s'appuie sur des données d'imagerie 3D obtenues après l'injection de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA mais ne prend pas en compte l'hétérogénéité de répartition de l'activité. Les doses absorbées moyennes aux organes, les courbes isodoses et les histogrammes dose-volume ont donc été calculés avec OEDIPE pour 25 cas cliniques. Ces données ont ensuite été utilisées pour déterminer la MIA respectant des critères de tolérance donnés.

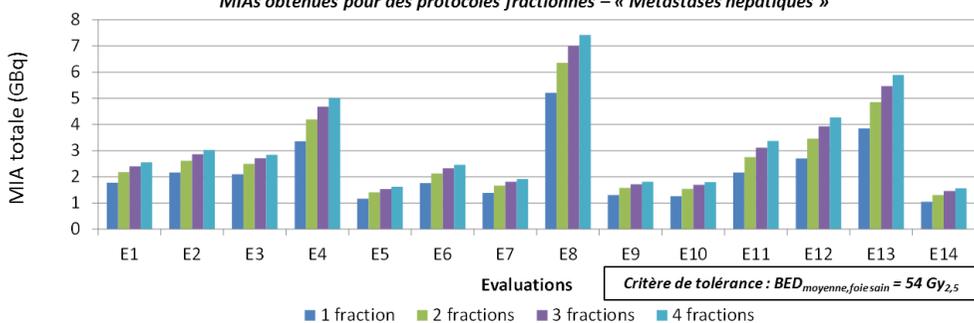
De plus, un module « Radiobiologie » a été implémenté dans le logiciel OEDIPE pour calculer la distribution 3D de la Dose biologique efficace (BED), qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité du débit de dose et des différences de radiosensibilité entre les tissus sains et les lésions. Ce module a ensuite été utilisé pour étudier la possibilité d'une optimisation des traitements SIRT à l'aide de protocoles fractionnés.

L'imagerie 3D de la distribution des  $^{90}\text{Y}$ -microsphères fait actuellement l'objet d'un travail d'amélioration en vue de la réalisation de la dosimétrie post-traitement qui, comparée à la dosimétrie établie avec la distribution des  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA, permettra d'évaluer le caractère prédictif des  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA. Enfin, une personnalisation plus poussée de la dosimétrie 3D est en cours, pour d'autres thérapies, grâce à la prise en compte de la biocinétique spécifique au patient.

MIA obtenues pour le modèle à Partition, la PMCD- $D_{moyenne}$  et la PMCD-HDVs



MIA obtenues pour des protocoles fractionnés – « Métastases hépatiques »



**En haut :** Activités maximales injectables pour les 25 cas étudiés (E1 à E25), déterminées à l'aide du modèle à partition, de la dosimétrie 3D personnalisée (PMCD) avec critère de tolérance sur les doses moyennes (Critère  $D_{moyenne}$  :  $D_{moy,Foie\ sain} < 30\ Gy$  et  $D_{moy,poumons} < 30\ Gy$ ) et de la dosimétrie 3D personnalisée avec critère de tolérance sur les histogrammes dose-volume (Critère HDVs :  $V_{30Gy} < 50\%$  pour le foie sain et  $V_{20Gy} < 35\%$  pour les poumons).

**En bas :** Activités maximales injectables pour les 14 cas de métastases hépatiques étudiés (E1 à E14), déterminées à partir de la distribution de la Dose biologique efficace pour différents fractionnements.



## **Mercredi 2 avril 2014**

### *Salle Le Loft*

*Président de session : M. GLEIZES*

#### **14h Session Radioprotection « Métrologie »**

A. HABIBI-ZATER Analyse de radioéléments en situation post-accidentelle. Détermination d'émetteurs alpha par couplage chromatographie liquide / ICP-MS

A. BOUAROURI Développement d'un système de mesure à 10 Hz de concentration d'aérosol atmosphérique

D. MAIRE Développement d'une chambre à projection temporelle utilisant une anode pixélisée pour les références en énergie et en fluence des champs neutroniques de basses énergies

B. SABOT Étalonnage des instruments de mesure de l'activité volumique du thoron dans l'air



Journées des thèses IRSN 2014



---

## **Analyse rapide de radioéléments en situation post-accidentelle Radiochimie automatisée et couplage avec la mesure**

<b>Doctorant :</b>	<b>Azza Habibi</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>03/12/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-ENV/STEME/LMRE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>TAF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Gérard Cote – ENSCP</b> <b>Dominic Larivière – Université Laval, QC, Canada</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Béatrice Boulet</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPMC/Ecole doctorale de Chimie Physique et de Chimie Analytique de Paris Centre (ED 388)</b>

---

La présente thèse s'inscrit dans le contexte post-Fukushima qui a conduit à la mise en place de nouveaux programmes de R&D à l'IRSN avec l'objectif d'améliorer les techniques d'analyses qui seraient utilisées en situation post-accidentelle pour mesurer des échantillons de l'environnement. Dans un cadre plus général, les incidents et accidents nucléaires survenus ces dernières années ont mis en évidence la difficulté de réaliser avec un délai court l'identification et la quantification des émetteurs alpha et bêta. En effet, les protocoles actuellement utilisés pour la surveillance de l'environnement sont très performants pour atteindre des limites de détection très basses, mais leur mise en œuvre est complexe (nombreuses manipulations) avec des temps d'analyse pouvant nécessiter plusieurs semaines pour certains radio-isotopes.

La première étape de l'étude a permis de dresser la liste des émetteurs alpha et bêta susceptibles d'être rejetés dans l'environnement suite à un accident nucléaire et non mesurables aisément par spectrométrie gamma. Dans une seconde phase, des protocoles d'analyse rapides sont en cours de développement pour les 20 radio-isotopes de U, Th, Pu, Am, Cm, Np et Sr retenus. L'objectif est d'automatiser l'étape de séparation radiochimique et de la coupler avec la mesure. La séparation est réalisée en employant des colonnes chromatographiques et la mesure est faite essentiellement par ICP-MS (*spectrométrie de masse à plasma induit*). La principale contrainte de ce couplage est la compatibilité des milieux d'élution des colonnes chromatographiques avec ceux de la mesure.

Les résultats obtenus avec des matrices synthétiques ont permis de définir un protocole de séparation mettant en œuvre jusqu'à trois colonnes et d'avoir une meilleure connaissance des propriétés physico-chimiques des éléments. D'excellentes performances ont d'ores et déjà été obtenues avec le protocole mis en place, hors couplage, pour les échantillons synthétiques et d'eau douce (rivière). Ces performances se caractérisent par des rendements  $\geq 80\%$  pour tous les éléments et de façon sélective et des écarts types  $\leq 10\%$  (après de nombreux réplicas indépendants). Enfin, les premiers tests de couplage sont prometteurs et permettent de prédire une durée de séparation et de mesure, pour les 7 éléments d'intérêt cités plus haut, inférieure à 2 heures.



*Figure 1. Couplage automatisé de la séparation radiochimique avec la mesure par ICP-MS*

---

## Développement d'un système de mesure à 10 Hz de concentration d'aérosol atmosphérique

<b>Doctorant :</b>	<b>BOUAROURI Assia</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>30/09/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SCA/LPMA - CNRS/DEA/LPGP</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>CNRS/IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Jean-Pascal Borra</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>François Gensdarmes</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>UPS/EDOM</b>

---

Afin d'évaluer l'impact des polluants sur l'environnement, l'estimation de la vitesse de dépôt sec des particules est nécessaire. Pour cela, une méthode développée à l'IRSN est basée sur le calcul du flux d'aérosols par corrélation turbulente (*eddy correlation*) entre les fluctuations de la concentration d'aérosol et celles de la vitesse verticale du vent mesurées à 10 Hz. L'objectif de la thèse est de développer un système de mesure de la concentration d'aérosol sur au moins deux gammes de taille (<100 nm et >100 nm) avec un temps de réponse de 100 ms, basé sur la détection électrique. L'aérosol est chargé par collection d'ions produits par une décharge électrique. Ensuite, les particules chargées sont séparées selon leurs mobilités électriques (reliées à leurs tailles). Le courant de particules chargées sur chaque gamme de taille permet d'évaluer la concentration d'aérosol correspondante.

Le courant de particules chargées dépend de la concentration d'aérosol, du débit de prélèvement et du niveau de charge des particules. Par ailleurs, le niveau de charge dépend au premier ordre du diamètre de la particule d'aérosol et du produit  $N_i \cdot \tau$  ( $N_i$ : densité moyenne d'ions vu par les particules ;  $\tau$  : temps de charge). Le courant de particules chargées doit être supérieur à la limite de détection de l'instrument de mesure. Pour des débits de prélèvements raisonnables (quelques dizaines de lpm), il faut réussir donc à atteindre des niveaux de charge suffisants malgré un temps de charge court (<100 ms afin de conserver l'information temporelle de la variation de concentration).

Le produit  $N_i \cdot \tau$  « vu » par les particules dépend non seulement du profil de densité d'ions dans la zone de charge, mais aussi de la trajectoire de l'aérosol dans le nuage d'ions. Ces variables sont contrôlées par les paramètres de la source d'ions (débit, courant d'ions) et aussi par les paramètres du mélange ions-aérosols (vitesse relative et taux de dilution). Après avoir optimisé deux sources d'ions en termes de courant d'ions en post décharge, nous nous intéressons à l'étude du mélange ions-aérosols afin de remplir les contraintes retenues pour le chargeur (relation charge diamètre contrôlée, pertes d'aérosol inférieure à 10 %, linéarité du courant de particules chargées avec la concentration d'aérosols monodispersés). Nous avons donc étudié différentes géométries de mélanges ions-aérosols. Nous présentons ici les résultats de charge d'aérosol obtenus avec les mélanges face à face et concentrique. Ces mélanges permettent de remplir les critères imposés pour la mesure en temps court notamment en termes de sensibilité de l'appareil.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## 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)

<b>Doctorant :</b>	<b>Donovan Maire</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>31/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-HOM/SDE/LMDN</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/LNE</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Daniel Santos – CNRS/LPSC</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Lena Lebreton</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Joseph-Fourier – Grenoble 1</b>

---

Dans le domaine des rayonnements ionisants, les installations produisant des champs neutroniques sont essentielles pour tester et étalonner les détecteurs de neutrons. Ces champs neutroniques doivent être caractérisés en énergie et en fluence pour être considérés comme des champs de référence. Pour mesurer directement la distribution en énergie et en fluence de champs neutroniques dont l'énergie est inférieure à 1 MeV, un détecteur gazeux ( $\mu$ -TPC pour *micro Time Projection Chamber*) est en cours de développement au Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (LMDN). L'IRSN, via le LMDN, est associé au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE), en détenant les grandeurs neutroniques de référence dont la distribution en énergie de la fluence neutronique.

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. Le principe de mesure des caractéristiques du champ neutronique consiste ici en la détection de noyaux de recul créés par l'interaction des neutrons (ou de la matière noire) avec la matière (ici le mélange gazeux).

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 8 keV et 1 MeV. Pour cela il faut :

- maîtriser le dispositif,
- développer un algorithme d'analyse,
- réaliser des simulations pour estimer la réponse du système,
- réaliser des campagnes de mesures sur des installations produisant des champs neutroniques,
- maîtriser les incertitudes associées à grandeurs d'intérêt,
- obtenir un fonctionnement, en routine, à la fin du projet.

Depuis le début du projet, plusieurs objectifs ont déjà été remplis :

- l'ensemble du dispositif a été réalisé et a été mis en service sur l'installation AMANDE du LMDN,
- un algorithme d'analyse des données et une modélisation du dispositif ont été développés,
- plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées sur l'installation AMANDE du LMDN,

- les analyses ont déjà montré les possibilités de reconstruction de l'énergie neutron à 27 keV, 127 keV, 144 keV, 250 keV et 565 keV,
- une source d'ions nommée COMIMAC a été développée au LPSC et installée au LMDN. Elle permettra d'améliorer la mesure de l'énergie des noyaux de recul,
- une nouvelle enceinte a été réalisée afin de limiter la diffusion des neutrons par l'enceinte,
- l'électronique du détecteur a été améliorée (temps de réponse plus court),
- la caractérisation des incertitudes est en cours avec Philippe Quere (IRSN/PSN-RES/SA2I/LIE), Eric Chojnaki (IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR) et Nicolas Fischer (LNE).

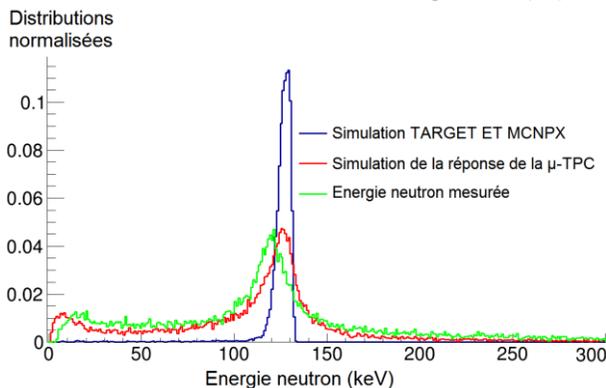
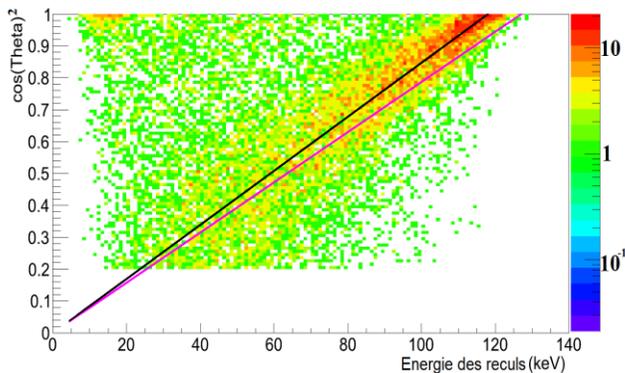


Figure 8. Résultat obtenu pour la reconstruction de l'énergie neutron à 127 keV. Le graphique de gauche montre le cosinus carré de l'angle de diffusion en fonction de l'énergie des particules. La loi théorique est représentée par une droite pour une énergie neutron de 122 keV (courbe noire) et de 127 keV (courbe rose). Le graphique de droite montre la reconstruction expérimentale (courbe verte) de l'énergie neutron comparée à la distribution théorique (courbe bleue) et la reconstruction de données

---

## Etalonnage des instruments de mesure de l'activité volumique du thoron dans l'air

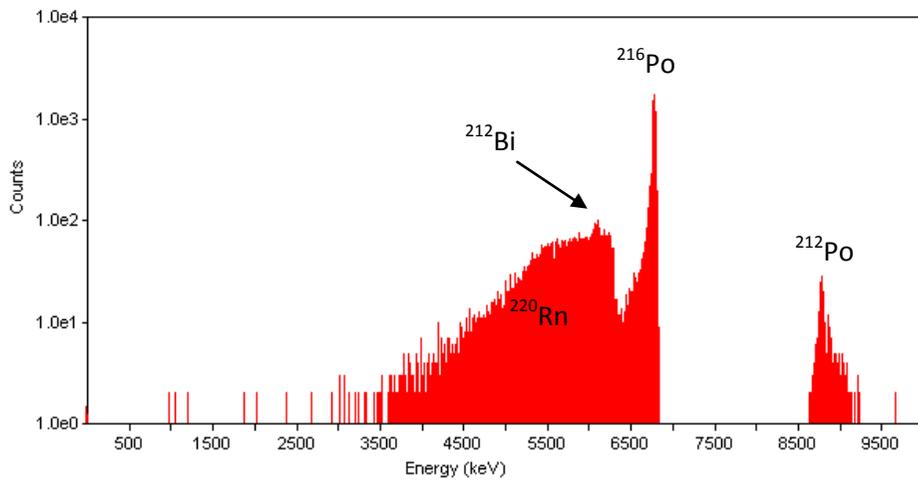
**Docteurant :** Benoît SABOT  
**Date du début de la thèse :** 25/10/2012  
**Laboratoire :** CEA/DRT/LIST/DM21/LNHB et IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA  
**Financement de thèse :** CEA et IRSN  
**Directeur de thèse :** Philippe Casette - CEA  
**Tuteur de thèse :** Nathalie Michielsen (IRSN) et Sylvie Pierre (CEA)  
**Ecole doctorale :** PARIS XI / MIPEGE

---

Le radon est l'une des principales sources d'irradiation naturelle et fait l'objet de mesures permanentes dans l'environnement. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la thématique métrologique dans le but d'améliorer l'évaluation de l'exposition des travailleurs et du public au radon. L'objectif de cette étude est de développer un système de production et de mesure en ligne de l'activité volumique du thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ), traçable aux étalons nationaux d'activité afin de qualifier et d'étalonner les instruments de mesure commerciaux.

La première partie de l'étude a consisté à effectuer des calculs de type Monte Carlo pour définir un volume de mesure contenant un détecteur de particules alpha, afin de mesurer l'activité volumique en thoron. La validation de cette méthode sera réalisée par le transfert de l'étalon primaire de radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) fondé sur la mesure alpha à géométrie définie d'une source de radon gelée à 80 K. Cette première étude, réalisée par simulation et mesures expérimentales sur deux types de volume, a permis de mettre en évidence la faisabilité mais aussi les contraintes liées à un tel dispositif. En effet, les particules alpha, émises par le gaz thoron, perdent vite de leur énergie dans l'air ; les spectres alpha obtenus seront donc dégradés en fonction de la géométrie utilisée. Les descendants produits par le gaz sont solides et eux aussi émetteurs alpha ; ils formeront des aérosols se déposant sur les parois ou en suspension, suivant les conditions expérimentales. Ces phénomènes vont encore plus dégrader le spectre et le rendent inexploitable.

Pour s'affranchir de ces contraintes, il a été décidé d'utiliser les propriétés électriques de ces descendants afin de les capturer à la surface du détecteur. Une étude bibliographique complète sur ces phénomènes de chargement et de neutralisation a permis d'établir toutes les conditions expérimentales optimales quant à la réalisation d'un tel dispositif. Des simulations à l'aide de code déterministe ont permis d'adapter la géométrie afin d'obtenir un champ électrique adéquat, tout en tenant compte des conditions de mécanique des fluides liées à la circulation du mélange gaz/aérosols dans le volume. Le prototype récemment conçu a permis de réaliser les premiers tests de mesures et de montrer son efficacité (spectre en figure ci-jointe). Il nous est possible d'identifier chaque élément de la chaîne du thoron comme prévu par les calculs Monte-Carlo. La suite va consister à raccorder le système aux étalons nationaux et à le qualifier.





## **Mercredi 2 avril 2014**

### ***Salle Le Forum***

*Président de session : G. HACHE*

#### **14h Session Sûreté « Combustible »**

J ARAYRO Comportement de gaz rares confinés dans une matrice céramique à haute température : modélisation par des approches semi-empiriques

T. MADANI Identification expérimentale de modèles thermo-mécaniques de zones cohésives pour des sollicitations complexes

X. HALLER Comportement des matériaux nanoporeux : application au combustible UO<sub>2</sub>

E. TORRES Étude de la diffusion de l'hydrogène dans les alliages de zirconium des gaines de combustibles nucléaires et son interaction avec le chargement mécanique.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Étude théorique de bulles de gaz rares dans une matrice céramique à haute température : modélisation par des approches semi-empiriques

<b>Doctorant :</b>	<i>Jack Arayro</i>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<i>01/10/2012</i>
<b>Laboratoire :</b>	<i>PSN-RES/SEMIA/LPTM</i>
<b>Financement de thèse :</b>	<i>IRSN/AREVA/CNRS</i>
<b>Directeur de thèse :</b>	<i>Guy Tréglia - CINaM</i>
<b>Tutrice de thèse :</b>	<i>Fabienne Ribeiro</i>
<b>Ecole doctorale :</b>	<i>Physique et Sciences de la Matière (AMU)</i>

---

Le dioxyde d'uranium  $UO_2$  est un combustible couramment utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée (REP). Il est donc essentiel d'en comprendre les propriétés mécaniques, thermiques et physico-chimiques dans les conditions de fonctionnement normales ou accidentelles du réacteur. Or, les réactions de fission de l'uranium génèrent des gaz rares tels que le xénon et le krypton qui, en raison de leur faible solubilité dans la matrice combustible, tendent à précipiter sous forme de bulles (intra-ou inter-granulaire) à l'intérieur de celle-ci. La présence de ces bulles modifiant les propriétés thermomécaniques du combustible, la compréhension de leur impact constitue un enjeu important en termes de sûreté.

Le but de ce travail est ainsi d'étudier du point de vue théorique l'effet des bulles de gaz intragranulaire sur le comportement thermomécanique du combustible par des simulations à l'échelle atomique, en utilisant des approches thermostostatiques telles que les techniques de Monte Carlo et de Dynamique Moléculaire fondées sur des modèles énergétiques mettant en jeu des potentiels semi-empiriques. Il s'inscrit ainsi dans la continuité du travail de Mehdi Colbert qui avait mis en évidence l'importance des effets de surface de cavités vides sur les propriétés mécaniques (constantes élastiques) et thermiques (conductivité et dilatation thermique) du combustible. Nous nous proposons donc maintenant d'étudier d'une part l'effet de la présence de gaz rares dans le combustible et d'autre part les effets d'interfaces entre ces gaz et la matrice.

Pour cela, nous nous sommes d'abord intéressés aux propriétés du xénon seul à haute température et haute pression, puis à l'effet de sa présence en contact avec la matrice d' $UO_2$ , d'abord selon une surface libre, puis confiné entre deux couches minces de  $UO_2$ , avant de passer à l'interface de nanobulles intragranulaires. Les isothermes d'adsorption/incorporation dans les différents systèmes mettent en évidence l'existence d'une transition structurale du xénon, depuis une phase diluée vers une phase dense, lorsqu'on augmente son potentiel chimique. L'analyse des microstructures et des fonctions de distribution radiale obtenues dans la phase condensée montre que la structure de cette dernière est intermédiaire entre les structures cubique centré et cubique à faces centrées.

Nous allons maintenant, avant de passer au cas de bulles, analyser ces résultats par une méthode, basée sur une approximation de champ moyen, qui doit nous permettre de déterminer les forces motrices des phénomènes observés (enthalpies de solution, entropie de vibration), étape nécessaire si l'on veut tirer des simulations à l'échelle atomique des informations transférables à l'échelle supérieure dans les codes thermomécaniques développés à l'IRSN.

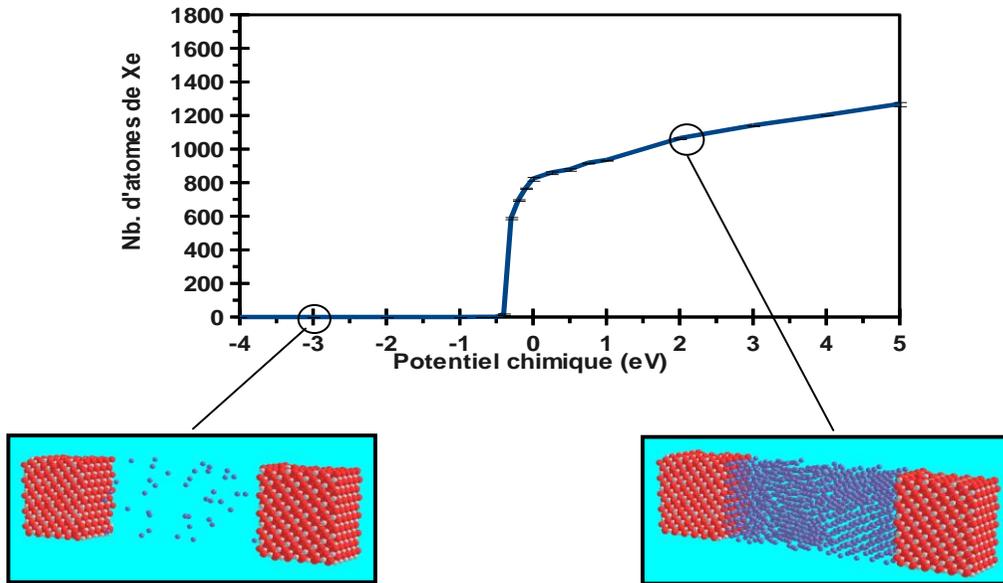


Figure 9: Exemple d'isotherme d'adsorption de Xe sur une couche mince d'UO<sub>2</sub> à une température de 300K. En insert, sont illustrées les microstructures diluées et denses observées en fonction du potentiel chimique (en bleu les atomes de Xe, en rouge de O et en gris de U).

---

## Identification de modèles thermo-mécaniques de zones cohésives pour des sollicitations complexes

Docteurant :	<i>Tarik MADANI</i>
Date du début de la thèse :	<i>18/11/2012</i>
Laboratoire :	<i>PSN-RES/SEMIA/LPTM</i>
Financement de thèse :	<i>IRSN</i>
Directeur de thèse :	<i>Bertrand WATTRISSE- Université Montpellier 2</i>
Tuteur de thèse :	<i>Céline PELISSOU</i>
Co-Directeur de thèse :	<i>Yann MONERIE</i> <i>Stéphane PAGANO</i>
Ecole doctorale :	<b>Université Montpellier 2, Information, Structures, Systèmes (I2S)</b>

---

Durant leur vie en réacteur, les gaines des crayons de combustible subissent d'importantes modifications de leur microstructure et passent progressivement d'un matériau monophasé métallique (le Zircaloy) à un matériau à gradient de propriétés. Il est primordial de savoir correctement reproduire les mécanismes d'endommagement et/ou de fissuration pour espérer traduire fidèlement les modes de ruines de la structure.

Les approches numériques par zones cohésives sont particulièrement commodes pour rendre compte de certains mécanismes d'endommagement et de fissuration dans les matériaux. Au travers d'une loi surfacique reliant l'effort de résistance à la séparation des lèvres d'une fissure en train de se créer à son ouverture, ces modèles permettent de suivre les mécanismes d'endommagement surfacique depuis l'amorçage des microfissures jusqu'à la rupture totale du matériau.

Récemment Richefeu (2010) et Wen (2012) ont proposé une démarche pour identifier la forme et les paramètres de lois de zones de cohésives dans des matériaux ductiles pour des sollicitations simples et quasi-statiques. Ce travail de s'étend à des situations plus représentatives du confinement des crayons de combustible. Nous nous sommes intéressés cette année à l'analyse de chargements complexes pour les matériaux ductiles : essais de déchirure ductile sur éprouvettes de type Single Edge Notch. Des essais mécaniques cycliques ont été effectués afin de caractériser la réponse thermo-mécanique de la matière lors du développement de l'endommagement et de la fissuration. Ces essais sont actuellement en cours de dépouillement à l'aide des outils de traitement d'image développés au LMGC. Cette première étape est nécessaire avant la mise en œuvre de traitements spécifiques mieux adaptés à la situation étudiée.

Dans ce type d'essais, les champs mécaniques sont hétérogènes. Pour construire le bilan d'énergie associé à la transformation, il est nécessaire d'estimer le champ de contrainte développé au sein de l'éprouvette. On propose ici d'estimer le champ de contrainte grâce à une méthode d'identification utilisant les données (cinématiques et thermiques) issues de l'imagerie (voir Figure 1). Cette méthode est basée sur l'écriture (puis la minimisation) d'une fonctionnelle de type « Erreur en Relation de Comportement » (ERC) dépendant de deux familles de paramètres : le champ de contrainte et les propriétés matérielles (élasticité, plasticité, endommagement).

Cette méthode a déjà été développée dans le cadre purement mécanique, et on se propose de l'étendre à la prise en compte supplémentaire de quantités énergétiques de nature calorimétrique (sources de chaleur). Dans un premier temps, nous avons cette année implémenté la méthode de l'ERC sur le logiciel Comsol MultiPhysics dans un cadre purement mécanique. La méthode fonctionne maintenant sur des géométries et des discrétisations matérielles quelconques en élasticité. La méthode est actuellement en train d'être étendue à la plasticité endommageable et à la prise en compte des énergies calorimétriques dans l'ERC.

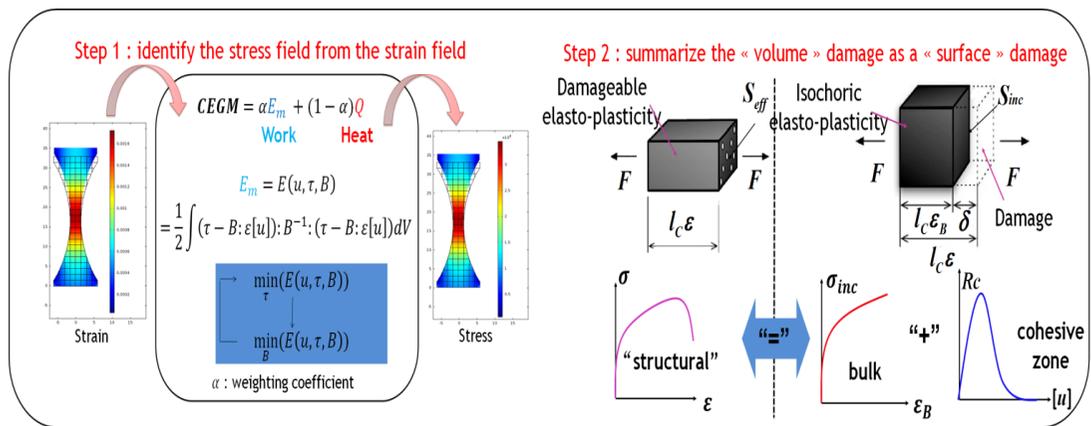


Figure 1 : schéma de principe de la méthode d'identification de propriétés cohésives proposée

---

## Comportement des matériaux nanoporeux : application au combustible $UO_2$

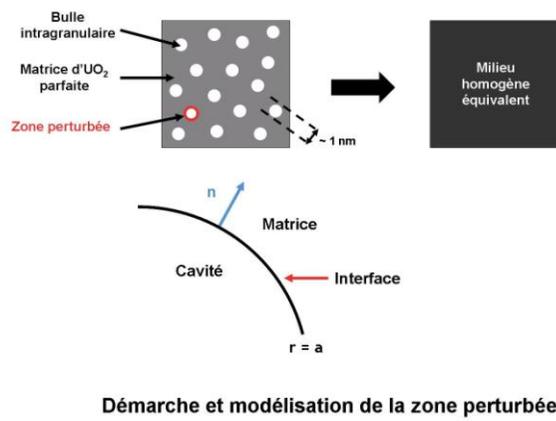
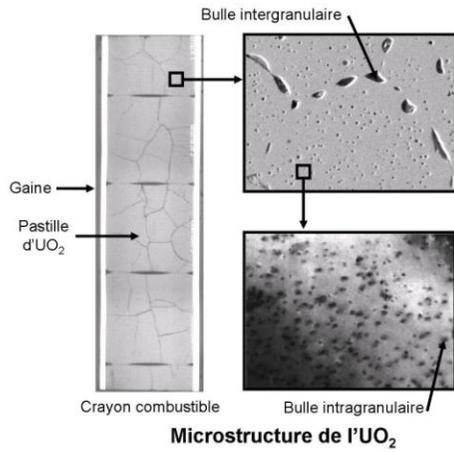
<b>Docteurant :</b>	<b>Xavier Haller</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>29/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SEMIA/LPTM</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>Cofinancement IRSN-EDF</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Yann Monerie – LMGC et Stéphane Pagano – LMGC</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Pierre-Guy Vincent</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Montpellier 2, I2S</b>

---

Le combustible des réacteurs à eau pressurisée (REP) se présente sous forme de pastilles cylindriques en dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ), empilées dans des gaines cylindriques en alliage de zirconium (crayons combustibles). La gaine est la première barrière de sûreté contre le risque de dispersion de matières radioactives dans l'environnement. Il est donc nécessaire de pouvoir garantir son intégrité en fonctionnement normal ou accidentel, notamment au cours d'un accident de réactivité (RIA) qui correspond à une évolution incontrôlée de la réaction nucléaire. SCANAIR est le code de simulation du comportement thermomécanique du combustible des REP en situation de RIA développé au sein du LPTM. Le code SCANAIR a besoin de lois de comportements mécaniques capables de prendre en compte l'évolution de la microstructure des matériaux au cours de leur séjour en réacteur.

Au cours de l'irradiation, deux populations de bulles apparaissent au sein de l' $UO_2$ , des bulles intergranulaires micrométriques et des bulles intragranulaires nanométriques de forme sphérique. Dans le cadre de la thèse de P.-G. Vincent (2007), un modèle a été établi pour prendre en compte cette microstructure particulière. Cependant des travaux de dynamiques moléculaires menés récemment à l'IRSN dans le cadre de la thèse de M. Colbert (2012) ont montré qu'il existe un effet de surface à l'échelle des bulles nanométriques. Cet effet est dû à la présence d'une zone perturbée de quelques rangées d'atomes entre les bulles intragranulaires et la matrice d' $UO_2$  et modifie de façon non négligeable le comportement mécanique effectif du combustible. L'objectif de la thèse est d'établir une loi de comportement mécanique pour l' $UO_2$  en RIA capable de prendre en compte l'effet de surface à l'échelle des bulles nanométriques.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée afin d'établir un état de l'art sur l'origine de ces effets de taille, leurs modélisations et les modèles micromécaniques associés existants. Un cadre général a été dégagé permettant de classer et de retrouver simplement ces différents modèles limités aux matériaux contenant des cavités sphériques distribuées de façon isotrope. Des travaux originaux permettant d'enrichir les modèles existants ont été démarrés, notamment sur la prise en compte de cavités ellipsoïdales.



---

## **Etude de la diffusion de l'hydrogène dans les alliages de Zirconium des gaines de combustible nucléaire et de son interaction avec le chargement mécanique**

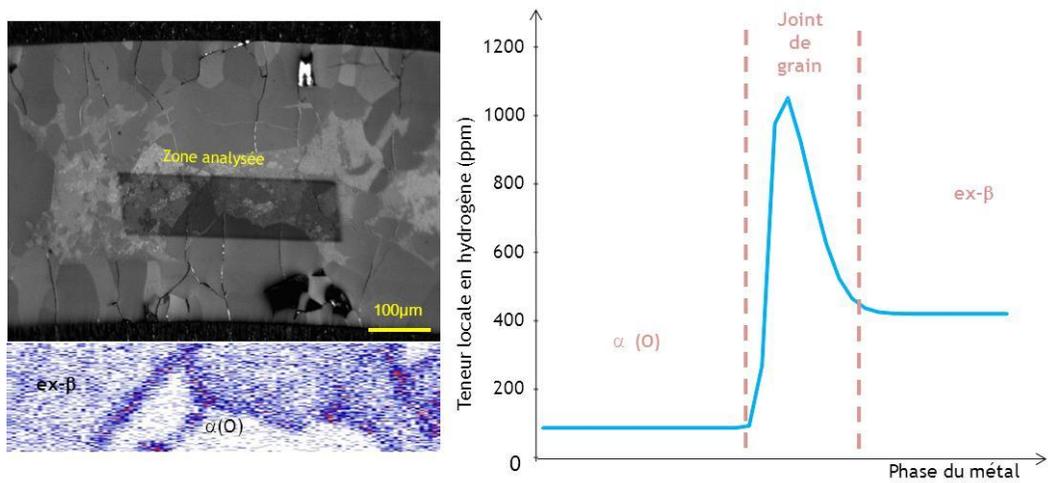
<b>Doctorant :</b>	<i>Elodie Torres</i>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<i>07/01/2013</i>
<b>Laboratoire :</b>	<i>PSN-RES/SEREX/LE2M</i>
<b>Financement de thèse :</b>	<i>IRSN - EDF</i>
<b>Directeurs de thèse :</b>	<i>Marie-Christine Baietto – INSA Lyon Michel Coret – Ecole Centrale Nantes</i>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<i>Jean Desquines</i>
<b>Ecole doctorale :</b>	<i>MEGA - INSA de Lyon</i>

---

Cette étude porte sur le comportement des gaines de combustible en situation d'accident de perte de réfrigérant primaire. Ces gaines, en alliage de zirconium, sont particulièrement sensibles à la fragilisation par l'hydrogène. On étudie tout particulièrement les conséquences de cette fragilisation lors de la trempe associée au renoyage du cœur. L'objectif de cette thèse est de comprendre et décrire les principaux mécanismes qui gouvernent la mobilité de l'hydrogène au sein de ces alliages à haute température. Cela implique de s'interroger premièrement sur le comportement et à la mobilité de l'hydrogène dans la gaine en fonctionnement normal. Cette thèse porte donc sur la diffusion de l'hydrogène depuis la fabrication de l'éprouvette représentative de l'état de référence du matériau irradié jusqu'à son influence à l'issue d'un APRP.

Les études disponibles sur la diffusion de l'hydrogène sont souvent consacrées à des températures inférieures à 550°C. La première partie de la thèse a consisté à faire un état des lieux des mécanismes d'adsorption et de diffusion observés à basse température. Des essais de chargement en hydrogène réalisés à l'Ecole Centrale de Paris sur des tubes en Zircaloy-4 ont permis de proposer un modèle et d'identifier une loi décrivant la cinétique d'adsorption à 420°C. Une modélisation couplée des échanges et de la diffusion de l'hydrogène en solution solide a été construite. Sa validation a été obtenue à partir des résultats expérimentaux de la thèse et complétée plus largement des expérimentations connues à ce jour dans la littérature.

L'étude de l'APRP implique la mise en œuvre de températures plus élevées et l'étude de la mobilité simultanée de l'hydrogène et de l'oxygène. Ces deux éléments présentent en effet une distribution complexe dans l'épaisseur de la gaine. Des tubes en Zircaloy-4 préalablement hydrurés ont été oxydés sous vapeur d'eau à 1200°C. De nombreuses caractérisations ont été combinées pour déterminer les propriétés microstructurales, physico-chimiques et mécaniques du matériau. Une distribution hétérogène de l'hydrogène a été constatée à partir de cartographie ERDA. L'hydrogène présente une forte affinité avec les joints de grains [?/?/?]. L'évolution des teneurs locales en hydrogène a permis d'identifier un profil de diffusion (figure 1).



*Figure 10 : Profil local en hydrogène après un transitoire thermique de type APRP obtenu à partir d'une cartographie ERDA*



## **Mercredi 2 avril 2014**

### ***Salle Le Loft***

*Président de session : D. GAY*

#### **16h10 Session plénière Géosphère**

I FATNASSI Diffusion de radionucléides en conditions physico-chimiques hors équilibre au travers de roches argileuses indurées : expérimentation versus simulation

C de la TAILLE Évaluation de l'activité sismique quaternaire des failles du Jura méridional

E. VI NHU BA Détection des failles et des zones de fracturation dans les calcaires supérieurs et les argilites de la station expérimentale de Tournemire par combinaison d'imagerie sismique Très Haute Résolution et de résistivité électrique



Journées des thèses IRSN 2014

---

## **Diffusion de radionucléides en conditions physico-chimiques hors équilibre au travers de roches argileuses indurées : expérimentation vs simulation**

<b>Doctorant :</b>	<b>Ikram FATNASSI</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>11/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PRP-DGE/SRTG/LETIS</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN/CEA/BELV</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Sébastien SAVOYE / CEA Philippe GOUZE / Université Montpellier II</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Charles Wittebroodt</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Montpellier II/SIBAGHE</b>

---

Le stockage en formation argileuse profonde est l'option privilégiée par plusieurs pays pour la gestion des déchets nucléaires HA-MAVL. L'évolution à long terme de ces stockages devrait être majoritairement régie par des processus géochimiques susceptibles de modifier les propriétés de confinement des matériaux naturels et artificiels utilisés. La prise en compte des effets de colmatage/dissolution dans les simulations de migration des radionucléides pose problème, notamment à cause du manque d'expériences quantitatives utilisées pour calibrer les modèles numériques. Si la diffusion est considérée comme le processus de transport dominant pour un stockage géologique, seules des expériences d'advection ont été réalisées pour étudier les effets du colmatage.

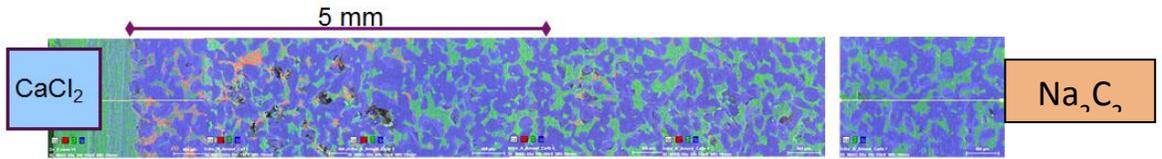
L'objectif de cette thèse est de tester la robustesse et la sensibilité des modèles numériques à reproduire des expériences de diffusion avec colmatage/dissolution au travers de matériaux de complexité croissante.

De premières expériences ont été réalisées sur des matériaux poreux inertes (sable, frittés de verre). Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule de « diffusion à travers » transparente permettant de visualiser l'apparition du précipité. Premièrement, les matériaux poreux sont caractérisés *via* une expérience de diffusion du deutérium. Ensuite, un nouveau traçage au deutérium est lancé simultanément à une expérience de colmatage faisant intervenir des solutions de  $\text{CaCl}_2$  et de  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . En parallèle, des simulations sont réalisées à l'échelle macroscopique avec des codes chimie-transport (HYTEC 3.7, Crunch) et à l'échelle des pores avec un code multiphysique (Freefem++).

Les résultats obtenus sur l'échantillon de sable montrent l'apparition d'un précipité d'oxalate de calcium associé à une diminution du flux de deutérium qui, malgré le colmatage, reste non-nul. Pour les frittés de verre, aucun changement significatif des flux de deutérium n'est enregistré. Les observations au MEB d'un frittés de verre montrent un colmatage partiel de la porosité avec la présence dispersée et limitée d'un précipité à la surface des grains (Figure 1).

Les simulations montrent qu'il existe, d'une part, des écarts entre les deux codes testés du fait des différents modèles utilisés pour décrire l'évolution des surfaces réactives et, d'autre part, des disparités avec les données expérimentales.

Ces expériences seront prochainement répétées sur des matériaux poreux réactifs (calcaire).



*En vert : pores remplis de résine (riche en carbone)*

*En bleu : milieu poreux (silice)*

*En rouge : précipité d'oxalate de calcium ( $\text{CaOx}$ )*

**Figure 11: Observation MEB (frittés de verre)**

---

## Évaluation de l'activité sismique quaternaire des failles du Jura méridional

<b>Doctorant :</b>	<b>Camille de La Taille</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>ISTerre / BERSSIN</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN / Assemblée des Pays de Savoie</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>François Jouanne - ISTerre</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Christian Crouzet (ISTerre) et Hervé Jomard (BERSSIN)</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Université Joseph Fourier / TUE</b>

---

A l'intérieur de l'ensemble jurassien, des accidents décrochants affectent une série sédimentaire déformée de 2 à 3 km d'épaisseur. Ces failles sont associées à une sismicité historique et instrumentale. Trois d'entre elles font l'objet de ce travail (du Nord au Sud) : les Failles du Vuache, de Culoz et du Col du Chat. Avant de rejoindre les lacs alpins du Bourget et d'Annecy, ces failles recoupent des plaines alluviales : secteur de Sillingy/Epagny/Meythet pour la Faille du Vuache (séismes de 1996 et du 06/04/2013), Marais de Lavours et de Chautagne pour la Faille de Culoz (séismes de 1822 et du 02/03/2014) (figure).

Des campagnes de sismique haute résolution effectuées dans les années 90 à des fins d'analyse paléo-climatique (Van Rensbergen et al., 1999) ont montré que les failles du Vuache, du Col du Chat et de Culoz ont localement déformé le remplissage sédimentaire quaternaire des lacs. Une nouvelle campagne spécifiquement consacrée à la mise en évidence de la géométrie superficielle des failles et des déformations qui y sont associées a été réalisée en octobre 2013 dans le lac du Bourget. Des profils très resserrés et à très haute résolution (entre 10 et 80 cm de résolution verticale) ont été acquis au cours de cette étude. En plusieurs endroits, les déformations atteignent les réflecteurs sismiques les plus récents, attestant d'une activité de ces failles au cours des derniers siècles.

La discussion de ces résultats est complétée par ceux issus d'observations structurales, géomorphologiques et géophysiques. En particulier, des profils de tomographie de résistivité électrique (ERT) réalisés à terre ont permis de mettre en évidence des contrastes de résistivité interprétés comme la signature des failles étudiées dans les sédiments quaternaires.

Nos premiers résultats ont permis de mieux contraindre la géométrie et la segmentation des failles étudiées et de proposer un premier scénario de l'activité quaternaire des segments de failles sur la base de l'âge des sédiments déformés. L'analyse des données acquises n'étant pas terminée, la quantification fine des déformations mises en évidence sera notre prochain objectif en vue de déterminer la récurrence des séismes sur ces failles et leur taux de déformation.

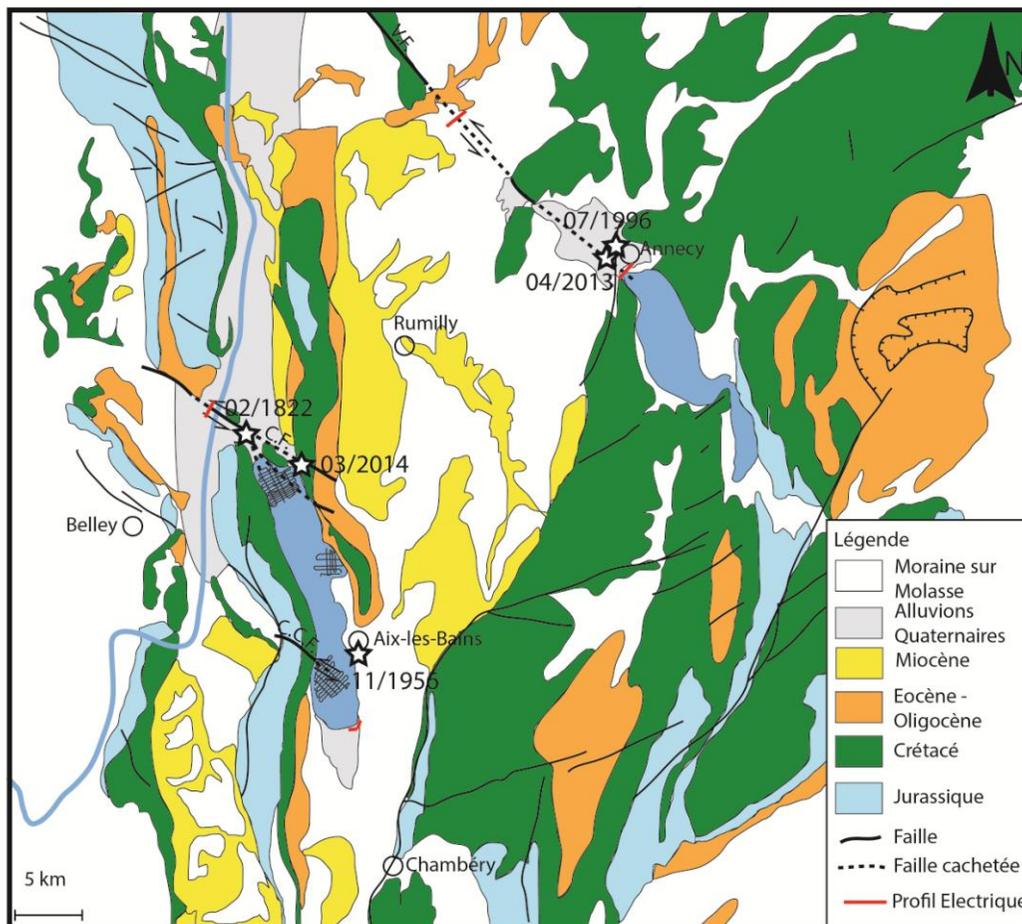


Figure : Carte géologique schématique du bassin savoyard présentant (1) : la localisation des séismes instrumentaux d'Epagny (1996, M=5.3), d'Ancey (2013, M=3.5) et de Chindrieux (04/2014, M=2.7) ainsi que celle présumée des séismes historiques de Chautagne (1822, I=VI-VII) et d'Aix les Bains (1956) attestant l'activité des diverses failles du secteur ; et (2) la localisation des profils sismiques réalisés en octobre 2013 et les profils électriques réalisés en janvier 2014. V.F. : Faille du Vuache, C.F. : Faille de Culoz, C.C.F. : Faille du Col du Chat.

---

## **Détection des failles et des zones de fracturation dans les calcaires supérieurs et les argilites de la station expérimentale de Tournemire par combinaison d'imagerie sismique Très Haute Résolution et de résistivité électrique**

<b>Doctorant :</b>	<b>Elise VI NHU BA</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>DEI/SARG/BERSSIN</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>co-financement IRSN/MINES ParisTech</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Mark NOBLE – MINES ParisTech</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Céline GELIS et Justo Cabrera - IRSN</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>MINES ParisTech/ Géosciences et Ressources Naturelles</b>

---

Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans le cadre général de l'expertise des projets de stockage de déchets radioactifs en couche argileuse. En effet la très faible teneur en eau et la petite taille des pores des roches argileuses indurées en font des roches très peu perméables où les circulations d'eau sont extrêmement faibles.

Cependant la présence de failles peut modifier ces propriétés ; la détection des failles constitue donc un enjeu majeur. Les méthodes géophysiques permettent de déterminer les propriétés du milieu ausculté de manière non destructive et présentent ainsi un potentiel intéressant pour détecter des failles dans le milieu argileux. En appui à l'expertise du projet de stockage mené par l'Andra, l'IRSN mène des travaux de recherche dans la station expérimentale de Tournemire où des failles à faible décalage vertical sont interceptées dans le milieu argileux depuis les ouvrages souterrains. Les travaux précédents ont montré la difficulté de détecter ces failles depuis la surface avec la sismique réflexion.

Cette thèse vise à traiter des données sismiques et électriques acquises depuis la surface et dans les ouvrages souterrains puis de les combiner dans le but d'évaluer leur capacité à détecter les zones de faille et de fracturation du site dans les argilites et les calcaires supérieurs. Le traitement des données sismiques s'effectue grâce à un code de tomographie développé au cours de cette thèse. Un tel développement permet d'avoir une compréhension totale des résultats obtenus, notamment en termes de résolution et de pertinence de l'image, conduisant ainsi à une interprétation avisée.

Ce code, déjà appliqué aux données sismiques 2D Haute Résolution acquises depuis la surface du plateau en 2010 dans le cadre du GNR TRASSE, a permis d'obtenir une coupe verticale des vitesses de propagation des ondes P dans les premiers mètres de la sub-surface au sein des calcaires supérieurs mais n'a pas permis d'imager le milieu en profondeur.

Afin de s'affranchir du problème de pénétration des ondes, une acquisition sismique en transmission (surface-ouvrages souterrains) a été réalisée en juillet 2013. Le traitement de ces nouvelles données permet de mettre en évidence la présence d'une discontinuité des vitesses sismiques dans les calcaires et argilites de la station expérimentale de Tournemire localisée à l'aplomb de la zone de faille visible depuis les ouvrages souterrains.



Journées des thèses IRSN 2014



## **Résumés sans présentation orale**



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Étude par des approches atomistiques de la fragilisation des gainages nucléaires due à la précipitation des hydrures

<b>Doctorant :</b>	<b>Alice Dufresne</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>01/10/2011</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SEMIA/LPTM</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>PACA/IRSN/CNRS</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Guy Tréglia – CINaM- Marseille</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Fabienne Ribeiro</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>Physique et Sciences de la Matière (AMU)</b>

---

Dans les réacteurs nucléaires, les éléments structurels et les gainages en zircaloy-4 sont situés dans un environnement aqueux à haute température et soumis à une forte irradiation. L'oxydation qui a lieu à la surface conduit à une production d'hydrogène, qui diffuse ensuite dans le zircaloy. Lorsque la concentration de cet hydrogène dans le zircaloy dépasse la limite de solubilité, il précipite sous forme d'hydrure de zirconium, et peut contribuer, notamment en fonction de son orientation, à la fragilisation de la gaine. Il est ainsi primordial pour les études de sûreté de bien comprendre les mécanismes qui gouvernent la précipitation et la remise en solution des hydrures. Même si les hydrures ont été étudiés ces dernières décennies, des contradictions existent dans la littérature, en particulier concernant la nature et la stabilité des phases d'hydrures et la cinétique de transformation. La plupart des études expérimentales sont basées sur des techniques indirectes ou des analyses post-mortem qui ne permettent pas d'obtenir des informations sur les mécanismes et la cinétique de précipitation et remise en solution des hydrures.

Jusqu'ici, la modélisation des hydrures à l'échelle atomique est principalement basée sur des approches ab-initio et ne permet pas l'étude de gammes de température réalistes. Le but de cette thèse est de clarifier le diagramme de phase des hydrures de zirconium ainsi que les mécanismes de précipitation/remise en solution et de mieux comprendre et quantifier les corrélations entre contraintes locales dans le métal et précipitation des hydrures. Pour atteindre ces objectifs, nous avons choisi de mettre en œuvre des approches de modélisation atomistique basées sur la description des interactions électroniques via le formalisme de liaisons fortes. La température sera prise en compte au travers d'approches de type Monte-Carlo.

Les étapes du travail sont les suivantes. Nous avons tout d'abord obtenu les potentiels interatomiques du modèle de liaisons fortes pour le zirconium par ajustement à des calculs de structure électronique réalisés en DFT. Nous avons ainsi dérivé des intégrales de saut, un terme répulsif et leur loi de dépendance en fonction de la distance. Une validation systématique de ce modèle est en cours par comparaison de nos résultats avec les données disponibles dans la littérature sur les principaux défauts : lacunaires, interstitiels... Cette méthodologie va maintenant être utilisée pour décrire l'interaction avec l'hydrogène. Enfin, nous développons un code Monte-Carlo dans les ensembles canonique et grand-canonique afin d'étudier le comportement des hydrures en température. Le diagramme de phase sera ainsi clarifié et une étude systématique nous permettra de mieux comprendre la corrélation entre contraintes locales et solubilité des hydrures.



Journées des thèses IRSN 2014

---

## Evaluation de l'efficacité *ex vivo* et *in vivo* de formes galéniques de calixarène pour le traitement de blessures superficielles contaminées par de l'uranium

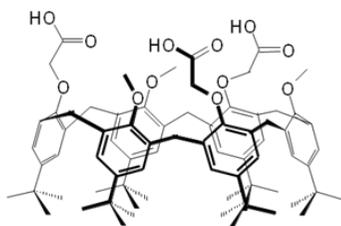
**Doctorant :** Sophie Grives  
**Date du début de la thèse :** 19/03/2012  
**Laboratoire :** CNRS UMR 8612 – IRSN PRP-Hom/SDI/LRC  
**Financement de thèse :** DGA/IRSN  
**Directeur de thèse :** Elias FATTAL - CNRS UMR 8612  
**Tuteur de thèse :** Guillaume PHAN  
**Ecole doctorale :** Paris-Sud 11/ED 425  
**Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué**

---

Dans les situations de contamination radiologique cutanée par des composés d'uranium, le seul traitement existant consiste en un rinçage de la zone contaminée, par de l'eau et des détergents, ou par une solution de Ca-DTPA. De plus, ce mode de contamination peut survenir sur des zones difficiles à traiter telles que des plaies. C'est dans ce contexte qu'un programme de recherche, en collaboration entre l'IRSN et l'UMR CNRS 8612, a été initié en 2006 dans le but de développer de nouvelles formes pharmaceutiques incorporant un agent chélatant, de la famille des calixarènes, afin de traiter spécifiquement les contaminations cutanées dues à des composés d'uranium. Les études actuelles visent à évaluer l'efficacité *ex vivo* et *in vivo* de ces formes galéniques consistant en une nano-émulsion huile dans eau (H/E) de calixarène fluide ou bien thermo-viscosante.

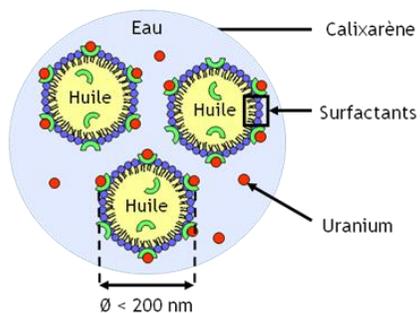
Des modèles de blessures superficielles, à la fois innovants et reproductibles, ont été développés et validés par un comité d'éthique pour être appliqués chez le rat. Les premières études sur cellules de diffusion transdermiques de Franz montrent que le passage des ions uranyle au travers d'une peau d'oreille de porc lésée par micro-coupures est trois fois plus important qu'au travers d'une peau intacte. Si la peau est lésée par des micro-aiguilles, le passage est alors cinq fois plus important. L'efficacité de décontamination de nos formulations topiques sur ces modèles est actuellement à l'étude.

De plus, l'efficacité de décontamination de notre nanoémulsion fluide a été évaluée *in vivo*, sur des rats Sprague Dawley présentant des blessures superficielles contaminées par une solution de nitrate d'uranyle. En accord avec les résultats obtenus *ex vivo*, la présence de blessures superficielles favorise le passage transcutané des ions uranyles. Ce passage diminue lors de l'application de nos formulations après contamination. En effet, dans nos conditions expérimentales, la quantité d'uranium excrétée par voie urinaire durant les 24 premières heures après contamination diminue de 96 à 99% entre des rats traités par de l'eau savonneuse et des rats traités par notre nanoémulsion fluide.



1,3,5-OCH<sub>3</sub>-2,4,6-OCH<sub>2</sub>COOH-p-tertbutylcalix[6]arene

Molécule de la famille des calixarènes :  
très bon chélatant de l'U



Nanoémulsion

---

## Utilisation et développement d'outils prédictifs pour l'évaluation des risques écotoxiques des radionucléides dans un contexte de multi-contamination

**Doctorant :** Adrien Margerit  
**Date du début de la thèse :** 06/02/2012  
**Laboratoire :** PRP-ENV/SERIS/L2BT  
**Financement de thèse :** TAF  
**Directeur de thèse :** Elena Gomez - Université Montpellier I  
**Tuteur de thèse :** Rodolphe Gilbin  
**Ecole doctorale :** Université Montpellier 1  
 **Systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosociences et environnement**

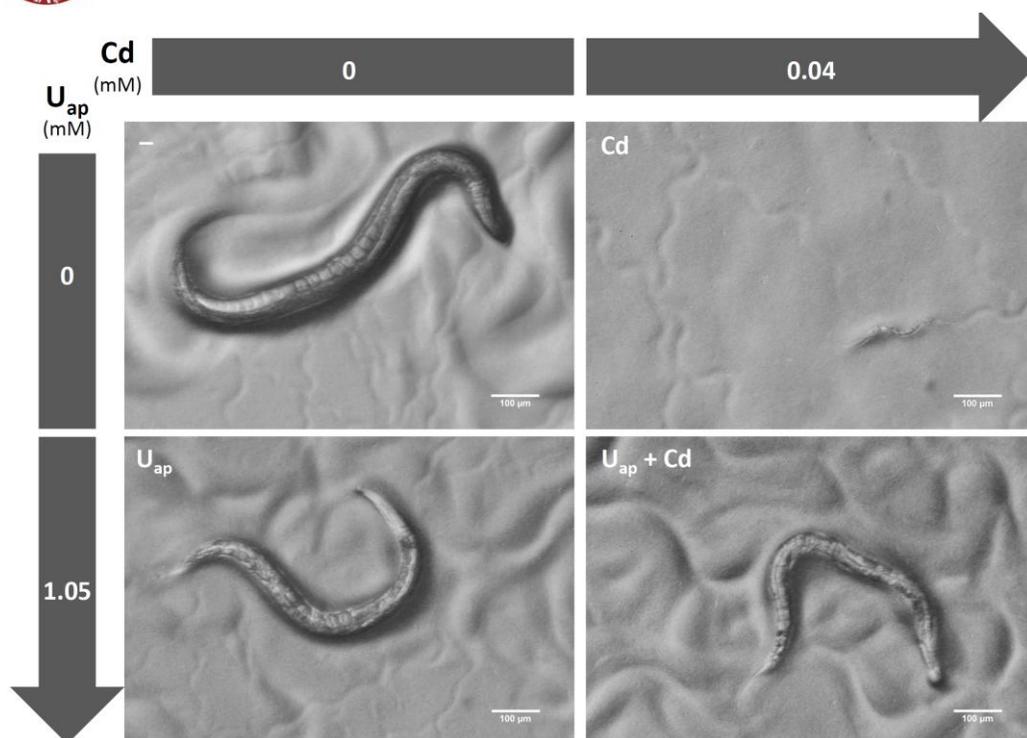
---

L'uranium (U) et le cadmium (Cd) sont deux contaminants dont la présence à proximité de certaines installations du cycle du combustible nucléaire peut être en partie reliée à un fonctionnement normal ou accidentel de celles-ci. Dans une démarche d'évaluation des risques écotoxicologiques, du fait de leur co-occurrence, l'étude des effets combinés de l'U et du Cd revêt un intérêt particulier, notamment dans l'éventualité d'une toxicité additive ou synergique. Des modèles descriptifs simples, basés sur une analyse des courbes dose-réponse des substances seules ou en mélange, sont couramment utilisés pour détecter et identifier les interactions entre contaminants (*e.g.* MixTox).

Dans cette étude, l'effet de l'interaction entre l'U et le Cd a été évalué sur la croissance et la reproduction du nématode *Caenorhabditis elegans* à travers deux expériences indépendantes. L'exposition des individus a été réalisée par des géloses contaminées sur lesquelles est déposé un tapis bactérien, source de nourriture du nématode. Un plan expérimental factoriel partiel comportant 1 condition contrôle, 14 conditions « substances seules » et 34 conditions « mélanges » a été utilisé afin de générer les données nécessaires à une modélisation MixTox.

L'analyse des données obtenues a permis d'identifier une interaction antagoniste ratio-dépendante entre l'U et le Cd, pour les deux critères d'effet. Une légère synergie pourrait également s'opérer dans les mélanges pour lesquels la toxicité de l'U est prédominante. L'ensemble des données obtenues a permis d'émettre l'hypothèse que l'U bloquerait partiellement l'internalisation (phase d'exposition ou toxicocinétique) ou l'action du Cd (phase toxicodynamique) au sein des nématodes.

L'exploration de la bioaccumulation de l'U et du Cd, seuls et en mélanges, par *C. elegans* pourrait donc constituer une piste intéressante afin de préciser les mécanismes sous-jacents à cette interaction antagoniste. Une première expérience de ce type a été réalisée avec des larves L1 de *C. elegans* (1 condition contrôle, 1 condition U seul, 3 conditions Cd seul et 3 conditions mélanges). Les échantillons sont en cours de préparation pour un dosage protéique suivi d'un dosage de l'U et du Cd par ICP-MS. Ces données complémentaires devraient permettre la rédaction d'un article scientifique sur les effets de la co-exposition de nématodes à l'U et au Cd.



**Figure :** Illustration de l'interaction antagoniste se produisant entre l'uranium appauvri et le cadmium sur la croissance du nématode *Caenorhabditis elegans* ; exemple pour une concentration d' $U_{ap}$  et d'une concentration de Cd. Les clichés ont été réalisés ~4j après éclosion des individus.

---

## Schémas numériques pour la modélisation de l'explosion

<b>Doctorant :</b>	<b>Nicolas Therme</b>
<b>Date du début de la thèse :</b>	<b>05/11/2012</b>
<b>Laboratoire :</b>	<b>PSN-RES/SAZI/LIE</b>
<b>Financement de thèse :</b>	<b>IRSN</b>
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>Raphaèle Herbin Université Aix-Marseille</b>
<b>Tuteur de thèse :</b>	<b>Laura Gastaldo</b>
<b>Ecole doctorale :</b>	<b>ED184 : Ecole doctorale en mathématiques et informatique de Marseille</b>

---

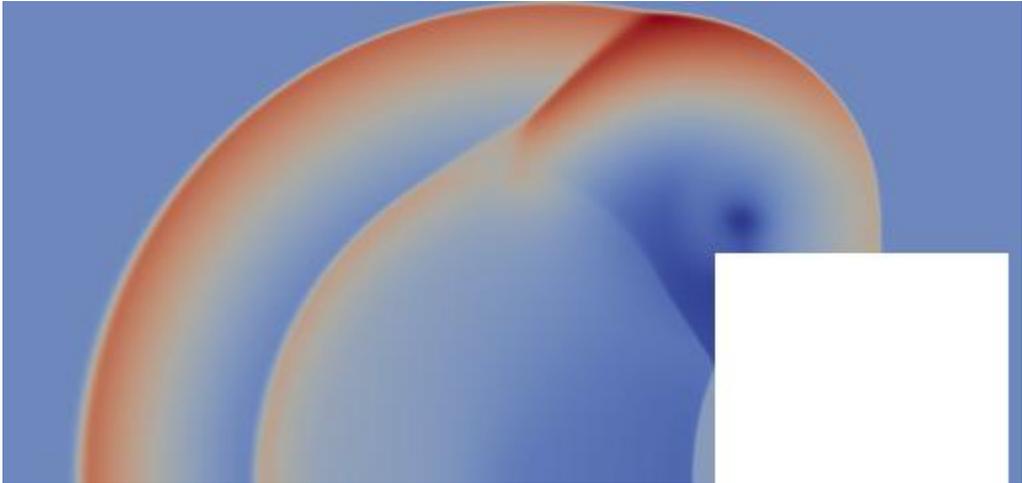
Dans les installations nucléaires, les explosions, qu'elles soient d'origine interne ou externe, peuvent entraîner la rupture du confinement et le rejet des matières radioactives dans l'environnement. Afin de pouvoir simuler les conséquences d'un tel accident, l'IRSN a récemment décidé de se doter d'un outil de simulation de l'explosion. C'est dans cette optique que se situe cette thèse en mathématiques appliquées.

Il s'agit de développer une classe de schémas permettant de résoudre numériquement le système d'équations aux dérivées partielles qui modélise le processus d'explosion. Dans un premier temps, on s'intéressera au système hyperbolique regroupant les équations d'Euler qui permet de caractériser le comportement d'un écoulement non visqueux et sans conductivité thermique en calculant sa vitesse, sa pression et sa densité. Il est constitué des équations de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie totale de l'écoulement.

Une classe de schémas explicites en temps de type volumes finis à mailles décalées a d'ores et déjà été développée au sein du laboratoire dans le cadre de travaux de thèse précédents. Les travaux de première année ont consisté en une reprise de ces schémas et une amélioration de leur précision en espace *via* des techniques d'interpolation affinées de type MUSCL. Afin de pallier certaines instabilités du schéma un modèle de viscosité résiduelle numérique a été rajouté au schéma. La stabilité du schéma suivant de nouvelles conditions CFL a été prouvée ainsi que la consistance du schéma par rapport aux équations du modèle continu.

Une implémentation a été effectuée dans le code CALIF<sup>3S</sup> développé par l'IRSN. Les résultats théoriques ont été validés numériquement en dimension 1 ainsi qu'en dimension 2. La propagation d'une onde de surpression consécutive à une explosion en présence d'un obstacle est donnée en exemple. Afin d'observer le gain en précision, une étude de taux de convergence a été effectuée en 1D *via* des comparaisons d'erreurs numériques.

La prochaine étape consiste à se concentrer sur la propagation du front de flamme lors de la déflagration et plus particulièrement sur la discrétisation spatiale de la G-équation qui modélise le phénomène. Le but est d'obtenir une discrétisation consistante qui permet de maintenir une forme correcte du front sur des maillages non forcément réguliers.



*Propagation d'une onde de surpression en présence d'obstacle*

## Liste des participants et index des présentations

Michèle	<b>AGARANDE</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMACE	
Frederic	<b>ALONZO</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
Lhassan	<b>AMARSID</b>	Doctorant	P 107
Jack	<b>ARAYRO</b>	Doctorant	P 129
Sarah	<b>BAGHDADI</b>	Doctorant	P 25
Pascal	<b>BAILLY DU BOIS</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC_OCTE	
Gauzelin	<b>BARBIER</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Marc	<b>BARRACHIN</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Jean	<b>BATTISTON</b>	IRSN/PSN-RES/SA2I	
Nicolas	<b>BAUDIN</b>	Doctorant	P 95
Mokrane	<b>BELHARET</b>	Doctorant	P 49
Ahmed	<b>BENTAIB</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/B2EGR	
Marie-Odile	<b>BERNIER</b>	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	
Jean-Marc	<b>BERTHO</b>	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	
Eric	<b>BLANCHARDON</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
Assia	<b>BOUAROURI</b>	Doctorant	P 121
Damien	<b>BOUFLERS</b>	Doctorant	P 103
Laurent	<b>BOUILLOUX</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	
Denis	<b>BOULAUD</b>	IRSN/PRP-ENV	
Béatrice	<b>BOULET</b>	IRSN/PRP-ENV/STEME/LMRE	
Nicolas	<b>BOUQUIN</b>	IRSN/DSDP/SPIIC	
Thierry	<b>BOURGOIS</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Florent	<b>BOURLIER</b>	AREVA	
Soleiman	<b>BOURROUS</b>	Doctorant	P 69
Céline	<b>BOUVIER-CAPELY</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LRC	
François	<b>BRECHIGNAC</b>	IRSN/DG	
Françoise	<b>BRETHERAU</b>	IRSN/DSDP	
David	<b>BROGGIO</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
Giovanni	<b>BRUNA</b>	IRSN/DG	
Adeline	<b>BUISSET-GOUSSEN</b>	Doctorant	P 57
Laurent	<b>CANTREL</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Sarah	<b>CARMINATI</b>	Doctorant	P 13
Philippe	<b>CASSETTE</b>	CEA/LNHB	



Sebastian	<b>CASTRILLON ESCOBAR</b>	Doctorant	P 33
Valérie	<b>CHAMBRETTE</b>	IRSN/SFRP	
Sabine	<b>CHARMASSON</b>	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LERCM	
Bernard	<b>CHAUMONT</b>	IRSN/PSN-RES	
Karine	<b>CHEVALIER-JABET</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Nourdine	<b>CHIKHI</b>	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	
Isabelle	<b>CLAIRAND</b>	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	
Stéphanie	<b>CLAVELLE</b>	IRSN/DCOM/UPI	
Rémi	<b>CLAVIER</b>	Doctorant	P 31
Gérard	<b>COTE</b>	Mines ParisTech	
Frédéric	<b>COUSIN</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Jean	<b>COUTURIER</b>	IRSN/DG	
Alicia	<b>CUVIER</b>	Doctorant	P 51
Maurice	<b>DALLONGEVILLE</b>	AREVA	
Alexandre	<b>DECRETON</b>	Doctorant	P 29
Camille	<b>DE LA TAILLE</b>	Doctorant	P 141
Simon	<b>DELCOUR</b>	Doctorant	P 65
Sylvie	<b>DERREUMAUX</b>	IRSN/PRP-HOM/SER/UEM	
Aurélien	<b>DESBREE</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
Jean	<b>DESQUINES</b>	IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M	
Céline	<b>DINOCOURT</b>	IRSN/PSN-RES/SAG/LETR	
Damien	<b>DRUBAY</b>	Doctorant	P 61
Brigitte	<b>DUBOIS</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Céline	<b>DUFFA</b>	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LERCM	
Alice	<b>DUFRESNE</b>	Doctorant	P 147
Christiane	<b>DUFRESNE</b>	Doctorant	P 53
Teni	<b>EBRAHIMIAN</b>		
	<b>GHESLAGH</b>	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LRTOX	
Jean-Michel	<b>EVRARD</b>	IRSN/PSN-RES	
Jérémy	<b>EYDIEUX</b>	Doctorant	P 15
Ikram	<b>FATNASSI</b>	Doctorant	P 139
Ghislain	<b>FERRAN</b>	Doctorant	P 81
Didier	<b>FRANCK</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LEDI	
Béatrice	<b>GAGNAIRE</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
Christophe	<b>GARNIER</b>	AREVA	



Jacqueline	<b>GARNIER-LAPLACE</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS	
Thomas	<b>GELAIN</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	
Céline	<b>GELIS</b>	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSIN	
François	<b>GENSDARMES</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
Alexandrine	<b>GESRET</b>	Mines ParisTech	
Marc	<b>GLEIZES</b>	IRSN/PRP-ENV/STEME	
Frédéric	<b>GOLDSCHMIDT</b>	IRSN/DSDP/SPIIC	
Kewin	<b>GOMBEAU</b>	Doctorant	P 43
Richard	<b>GONZALEZ</b>	IRSN/PSN-RES	
Jules	<b>GOULIER</b>	Doctorant	P 75
Michel	<b>GRADECK</b>	CEA/LNHB	
Sophie	<b>GRIVÈS</b>	Doctorant	P 149
Rodolfo	<b>GURRIARAN</b>	IRSN/PRP-ENV/STEME/LMRE	
Isabelle	<b>GUYOT</b>	IRSN/DSDP/SPIIC	
Azza	<b>HABIBI-ZATER</b>	Doctorant	P 119
Georges	<b>HACHE</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Wim	<b>HAECK</b>	IRSN/PSN-EXP/SNC/LNR	
Xavier	<b>HALLER</b>	Doctorant	P 133
Adrien	<b>HILAIRE</b>	Doctorant	P 105
Christelle	<b>HUET</b>	IRSN/PRP-HOM/SDE/LDRI	
Jérôme	<b>JOLY</b>	IRSN/DG	
Hervé	<b>JOMARD</b>	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSIN	
Neige	<b>JOURNY</b>	Doctorant	P 23
Ahmed	<b>KACEM</b>	Doctorant	P 99
Jean-Claude	<b>LABORDE</b>	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSIN	
Patrick	<b>LALOI</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Anne-Sophie	<b>LAURENT</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Dominique	<b>LAURIER</b>	IRSN/PRP-HOM/SRBE/LEPID	
Léna	<b>LEBRETON</b>	IRSN/PRP-HOM/SDE/LMDN	
Catherine	<b>LECOMTE-PRADINES</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
Thomas	<b>LE DEZ</b>	Doctorant	P 79
Antoine	<b>LE GUERNIC</b>	Doctorant	P 89
Clelia	<b>LE GALLIC</b>	Doctorant	P 59
Marie	<b>LEGRAND</b>	Doctorant	P 87
Nathalie	<b>LEMAITRE</b>	IRSN/DSDP/SPS	



Charlotte	<b>LELEU</b>	IRSN/DSDP/SPIIC	
Ahmed	<b>MABROUK</b>	Doctorant	P 35
Tarik	<b>MADANI</b>	Doctorant	P 131
Donovan	<b>MAIRE</b>	Doctorant	P 123
Zakaria	<b>MANA</b>	Doctorant	P 71
Pierre	<b>MARCHAL</b>	Doctorant	P 67
Adrien	<b>MARGERIT</b>	Doctorant	P 151
Denis	<b>MARO</b>	RSN/PRP-ENV/SERIS/LRC_OCTE	
Emmanuel	<b>MATHE</b>	Doctorant	P 17
Renaud	<b>MEIGNEN</b>	IRSN/PRP-ENV/SERIS/LECO	
Nicolas	<b>MEYNET</b>	RSN/PRP-ENV/SERIS/LRC_OCTE	
Nathalie	<b>MICHELSEN</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
Fabien	<b>MILLIAT</b>	IRSN/PRP-HOM/SRBE/L3R	
Elodie	<b>MINTET</b>	Doctorant	P 39
Alexandra	<b>MOIGNIER</b>	Doctorant	P 111
Cyril	<b>MOIGNIER</b>	Doctorant	P 113
Catherine	<b>MONIER</b>	IRSN/PSN-SRDS/SCOREX	
Emmanuelle	<b>MUR</b>	IRSN/DSDP/BC2S	
Stefania	<b>MUSILLI</b>	Doctorant	P 91
Georges	<b>NAHAS</b>	IRSN/PSN-EXP/SES/BEGC	
Mark	<b>NOBLE</b>	Mines ParisTech	
François Xavier	<b>OUF</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LPMA	
François	<b>PAQUET</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Florian	<b>PARISOT</b>	Doctorant	P 45
Céline	<b>PELISSOU</b>	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Sylvain	<b>PETIT</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Alice	<b>PETITGUILLAUME</b>	Doctorant	P 115
Denis	<b>PETITPREZ</b>	Univ de Lille	
Sylvie	<b>PIERRE</b>	CEA	
Emmanuel	<b>PORCHERON</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LECEV	
Laurent	<b>POURCELOT</b>	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LERCM	
Hugues	<b>PRETREL</b>	IRSN/PSN-RES/SA2I/LEF	
Christelle	<b>PROSPER</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Michel	<b>QUINTARD</b>	IMFT Toulouse	
Estelle	<b>RAGE</b>	IRSN/PRP-ENV/SESURE/LERCM	



Alain	<b>RANNOU</b>	IRSN/PRP-HOM	
Emilie	<b>RANNOU</b>	Doctorant	P 21
François	<b>REBIERE</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LRC	
Valérie	<b>RENAUD-SALIS</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI	
Malvina	<b>RENNESSON</b>	AREVA	
Jacques	<b>REPUSSARD</b>	IRSN/DG	
Fabienne	<b>RIBEIRO</b>	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LPTM	
Laurent	<b>RICCIARDI</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	
Jerome	<b>RICHARD</b>	IRSN/PSN-RES/SCA/LEMAC	
Marie-Christine	<b>ROBE</b>	IRSN/DRH	
Anthony	<b>RONDEAU</b>	Doctorant	P 11
Véronique	<b>ROUYER</b>	IRSN/DSDP	
Pierre	<b>RUYER</b>	IRSN/PSN-RES/SEMIA/LIMAR	
Benoit	<b>SABOT</b>	Doctorant	P 125
Jean-Christophe	<b>SABROUX</b>	IRSN/PSN-RES/SCA	
Matthieu	<b>SCHULER</b>	IRSN/DSDP	
Oona	<b>SCOTTI</b>	IRSN/PRP-DGE/SCAN/BERSSIN	
Irène	<b>SOROKINE-DURM</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Mouhmadou	<b>SY</b>	Doctorant	P 50
Christian	<b>TAMPONNET</b>	IRSN/DG	
Christine	<b>TESSIER</b>	IRSN/PRP-HOM/SDI/LRC	
Nicolas	<b>THERME</b>	Doctorant	P 153
Elodie	<b>TORRES</b>	Doctorant	P 135
Julien	<b>TRINCAL</b>	Doctorant	P 77
Kevin	<b>VARRALL</b>	Doctorant	P 97
Aurélie	<b>VAURIJOUX</b>	Doctorant	P 41
Fabienne	<b>VAYRON</b>	IRSN/DSDP/SPS	
Elise	<b>VI NHU BA</b>	Doctorant	P 143
Sergey	<b>ZHIVIN</b>	Doctorant	P 85

Pôle radioprotection (PRP) : Protection de l'homme (HOM),  
 Environnement (ENV),  
 Déchets et géosphère (DGE)

Pôle sûreté nucléaire (PSN) : Recherches en sûreté (RES),  
 Expertises en sûreté (EXP),  
 Systèmes, nouveaux réacteurs et démarches de sûreté  
 (SRDS)



# *Notes*



Journées des thèses IRSN 2014



Journées des thèses IRSN 2014



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**Siège social**

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

**Téléphone**

+33(0)1 58 35 88 88

**Site internet**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)