Livret des thèses 2023

Serge Dreuil, Sandrine Marano, Véronique Laget

▶ **To cite this version:**

Serge Dreuil, Sandrine Marano, Véronique Laget. Livret des thèses 2023 : du 28 au 31 mars - Journée des thèses 2023 : la Grande-Motte. Journée des thèses, année 2023, pp.1-150, 2023. irsn-04350804

HAL Id: irsn-04350804
https://irsn.hal.science/irsn-04350804

Submitted on 18 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

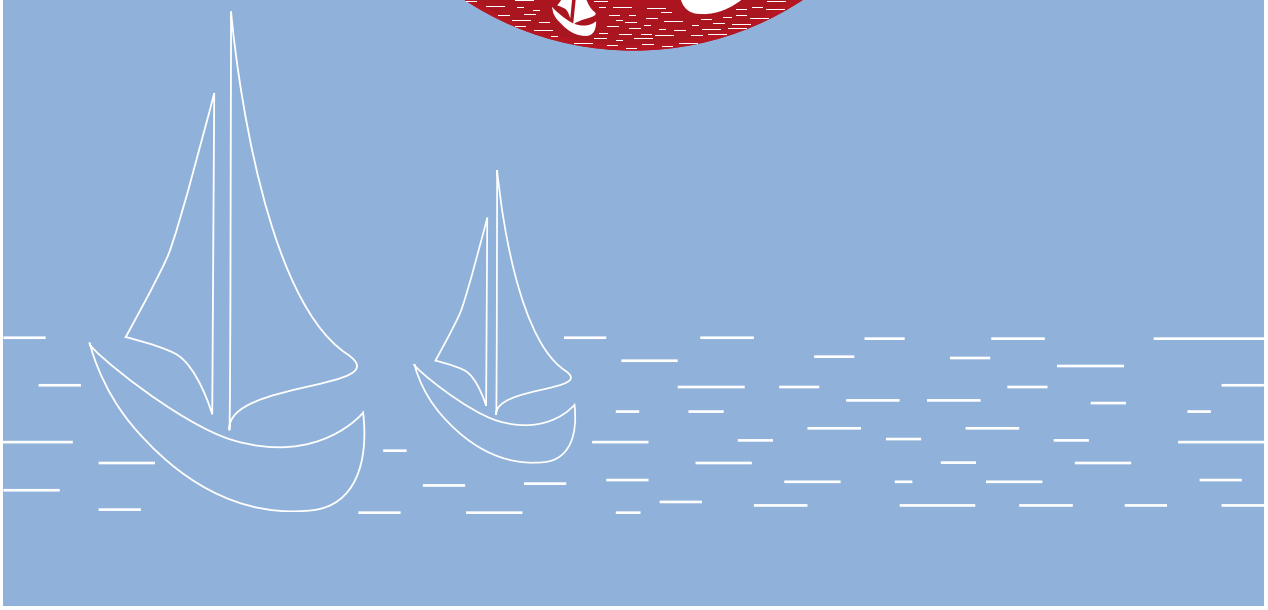
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

LIVRET DES THÈSES 2023

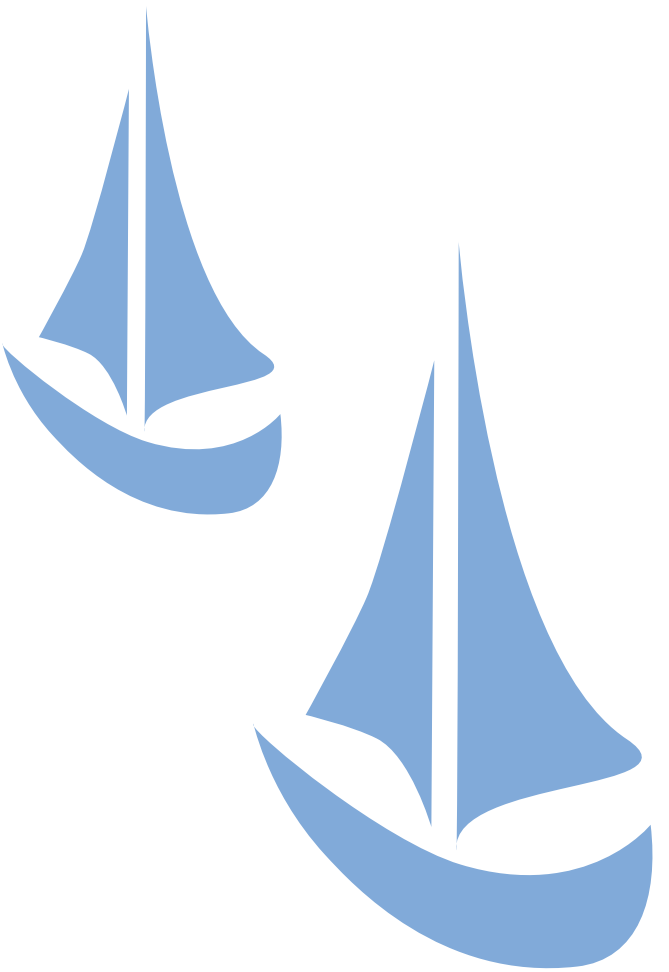


MEMBRE DE
ETSON

JOURNÉES DES THÈSES 2023

› › › 28 - 31 mars

Programme des sessions



SOMMAIRE

PROGRAMME DES JOURNÉES DES THÈSES 2023 P. 5 - 10

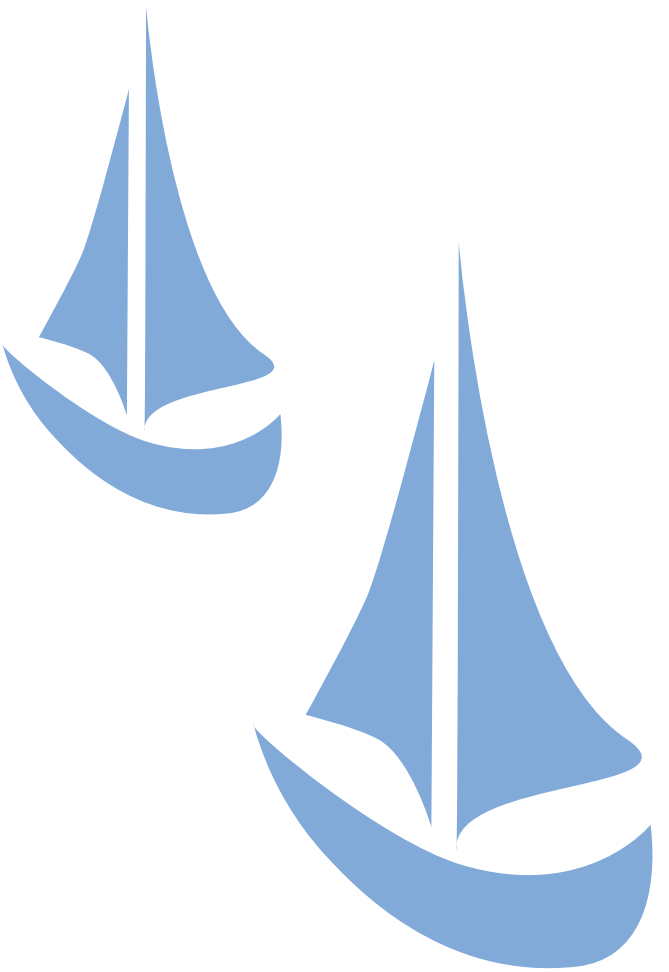
AU FIL DES SESSIONS

- Les sessions orales du mercredi 29 mars P. 11 - 55
- Les sessions orales du jeudi 30 mars P. 56 - 96
- Les sessions posters P. 97 - 132

LES SOIRÉES ET AUTRES INFORMATIONS P. 133 - 144

- Présentation de la table ronde du 28 mars P. 133
- Soirée du 30 mars P. 134
- Et si vous déposiez un brevet ? P. 135
- Devenir professionnel des doctorants de l'IRSN, générations 2017 à 2019 P. 136 - 137
- L'information scientifique et technique P. 138 - 141
- Présentation de l'ADI[N] P. 142 - 143
- Présentation de l'ASTHEC P. 144

LISTE DES SERVICES ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS P. 145 - 146



PROGRAMME

Mardi 28 mars

12 h 00 - 12 h 30 **Accueil - Remise des badges et des clés des logements**

12 h 30 - 13 h 30 **Déjeuner**

14 h 00 - 16 h 15 Salle 3 Fontaines
Sensibilisation à la science ouverte (réservé aux doctorants de 2e et 3e années)

14 h 00 - 16 h 15 Salle Camargue
Accueil des doctorants de 1ère année

16 h 15 - 18 h 30 **Activités de cohésion doctorants - Session organisée par l'ADiN**

19 h 00 - 19 h 45 **Cocktail de bienvenue**

19 h 45 - 20 h 45 **Dîner**

21 h 00 - 22 h 30 Salle 3 Fontaines
Table ronde : la place de l'intelligence artificielle dans la recherche

Mercredi 29 mars

08 h 30 - 9 h 35 Salle 3 Fontaines
Caractérisation, détection et modélisation d'un béton vieilli
Président : Gauzelin BARBIER
Responsable programme R&D Vieillissement des matériaux (PSN-RES)

Sirine AL DANDACHLI - Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales.

Lucie GOMEZ - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradations des granulats lors d'une alcali-réaction.

Rita TABCHOURY - Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons.

Klayne DOS SANTOS SILVA - Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non-destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE.

08 h 40 - 09 h 35 Salle Camargue
Processus de transfert des radionucléides dans l'environnement
Président : Olivier RADAKOVITCH
Chargé d'études en sciences de l'environnement (PSE-ENV / SRTE / LRTA)

Zeinab MAWASSY - Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire de radionucléides sous forme particulaire.

Thomas SEYER - Modélisation du transfert des radionucléides dans le Golfe du Lion.

Léonore FLIPO - Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide/liquide de radionucléides dans les fleuves.

09 h 40 - 10 h 30 Salle Camargue

› Vieillissement et surveillance des matériaux du stockage géologique de déchets radioactifs **Page 21**

Président : Dr Jean-Michel MATRAY
Ingénieur-chercheur, spécialiste des transferts de radionucléides dans la géosphère (PSE-ENV / SEDRE / LETIS)

Rémy HOARAU BELKHIRI - Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme.

Jad EL ALAM - Spectral Induced Polarization (SIP) monitoring of swelling clays: A case study of the Modern2020 *in situ* tests at the Underground Research Laboratory in Tournemire.

Mohamed Haythem BAHLOULI - Analyse des incertitudes issues de la modélisation couplée HM Gaz à grande échelle dans une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs.

09 h 40 - 10 h 35 Salle 3 Fontaines

› Modélisation de la mécanique des matériaux réacteurs **Page 25**

Président : Dr Jean DESQUINES
Ingénieur-chercheur (PSN-RES / SEREX / LE2M)

Zafilaza Armi MANOROSOA - Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grains dans l'UO_2.

Loïc CHAIX - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié.

Clément TOSI - Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l'UO_2 irradié.

10 h 35 - 11 h 05 › Pause café

11 h 05 - 11 h 55 Salle 3 Fontaines SESSION PLÉNIÈRE

› Processus de transfert de l'uranium dans les sols **Page 29**

Présidente : Dr Laureline FEVRIER
Chercheuse (PSE-ENV / SRTE / LR2T)

Tingting GENG - The use of stable lead isotopes for the identification of the sources and transport processes leading to the release of radioactive contaminants downstream of former uranium mine sites.

Séléna FERRERES - Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire.

Louise DARRICAU - Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères.

12 h 00 - 13 h 30 › Déjeuner

13 h 30 - 14 h 30 Salle Frédéric Mistral SESSION POSTERS

14h30 - 15h35 Salle 3 Fontaines SESSION PLÉNIÈRE

› Radiotoxicologie **Page 33**

Président : Dr Stéphane GRISON
Chercheur (PSE-SAN / SESANE / LRTOX)

Pierre TECHER - Comprendre la réponse adaptative des *Daphnia Pulex* de la zone d'exclusion de Tchernobyl.

Théo FRECHARD - Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale *in vivo* chez le rat.

Florian SALIOU - Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de trouble du rythme et autres pathologies cardiaques à long terme.

Goran RIAZI - Impacts d'irradiations uniques de rayons X sur des modèles murins de développement d'anévrisme aortique.

15h35 - 16h05 › Pause café

16h05 - 17h00 Salle 3 Fontaines

› Épidémiologie des rayonnements ionisants **Page 39**

Présidente : Dr Clémence BAUDIN
Chercheuse en épidémiologie (PSE-SAN / SESANE / LEPID)

Mohamed Yassir ERRAHMANI - Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein

Julie LOPES - Analyse du risque radio-induit de décès chez les professionnels de santé exposés aux rayonnements ionisants

Julie FENDLER - Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire.

16h05 - 17h00 Salle Camargue

› Études de comportement du béton **Page 43**

Président : Georges NAHAS
Ingénieur-chercheur, conseiller scientifique du projet ODOBA (PSN-EXP / SES / LMAPS)

Joe MAALOUF - Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI).

Omar NAJJAR - Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave.

Maryam TRAD - Techniques de modélisation multi-échelle de l'interface acier-béton pour le calcul de structures en béton armé à grande échelle.

17h05 - 17h55 Salle 3 Fontaines

› Mesures physiques des rayonnements ionisants **Page 47**

Président : Dr Amokrane ALLAOUA
Chef de laboratoire (PSE-SAN / SDOS / LMDN)

Ronan LELIÈVRE - Mesure des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes.

Louis ERMENEUX - Dosimétrie des systèmes IRM-Linac utilisés en radiothérapie externe : étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D.

Enya MOBIO - Conception d'un champ neutronique épithermique pour l'étalonnage d'instruments de radioprotection et développement d'une méthode de spectrométrie des neutrons dédiée à leur caractérisation entre 0,5 eV et 10 keV.

17 h 05 - 18 h 05 Salle Camargue

› Thermohydraulique et interactions fluide-structure

Président : Olivier MARCHAND
Adjoint au Directeur de la Recherche en Sûreté (PSN-RES)

Joauma MARICHAL - Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts avec ébullition et évaporation.

Victoria HAMTIAUX - Simulations numériques directes de la convection naturelle dans un bassin contenant un milieu poreux chauffé.

Giuseppe SPINA - Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire.

Florian REIN - Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave.

19 h 45 - 20 h 45 › Dîner

20 h 45 - 22 h 45 › Atelier Fresque du Climat (sous réserve)

› Jeudi 30 mars

08 h 30 - 10 h 10 Salle 3 Fontaines

› Radiobiologie

Présidente : Dr Agnès FRANCOIS
Experte des expositions aux fortes doses (PSE-SAN / SERAMED / LRMed)

Ahmad SLEIMAN - Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode C.elegans : rôle de la mitochondrie et des dommages à l'ADN nucléaire.

Martin JESTIN - Modification du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser le processus de régénération épithéliale.

Yann THIBAUT - Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire.

Marie FREREJACQUES - Étude Adverse Outcome Pathway (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide à l'aide d'un modèle organoïde rénal.

Polina ARSENTEVA - Modélisation multi-échelle de l'efficacité biologique relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants.

08 h 40 - 10 h 10 Salle Languedoc

› Modélisation des aléas naturels et de leurs impacts sur les structures / Évaluation du risque d'accident nucléaire

Présidente : Dr Oona SCOTTI
Recherche et expertise en aléa sismique (PSE-ENV / SCAN / BERSSIN)

Nicolas CATHELIN - Caractérisation du mouvement Quaternaire de la terminaison NE du système de failles des Cévennes.

Loïc GISSELBRECHT - Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs.

Julien CLEMENT - Caractérisation de l'Interaction Sol Structure au travers de la mesure *in situ* de la fonction d'impédance.

Charlie SIRE - Méthodes de quantification pour la visualisation de l'aléa inondation.

Rémi HANNOTEL - Internaliser le risque d'accident nucléaire dans le mix électrique.

08 h 50 - 10 h 10 Salle Camargue

› Modélisation de l'incendie et de l'explosion **Page 69**

Président : Dr Hugues PRETREL
HDR, Ingénieur-Chercheur, Expert IRSN (PSN-RES / SA2I / LEF)

Safir HADDAD - Étude de la propagation et du contrôle des fumées en galeries souterraines complexes : Application à la maîtrise du risque pour des configurations de stockage de déchets radioactifs.

Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY - Modelling of Turbulence-Combustion Interactions (TCI) for the Simulation of Fires in Confined and Ventilated Enclosures.

Emeline GEORGES - Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé.

Raphaël GAVART - Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type.

10 h 10 - 10 h 35 › Pause café

10 h 35 - 12 h 00 Salle 3 Fontaines SESSION PLÉNIÈRE

› Aide à la prise en charge de victimes d'irradiation **Page 75**

Président : Dr François TROMPIER
Ingénieur-chercheur (PSE-SAN / SDOS / LDRI)

Antonin DESCHEMPS - Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologique.

Lucie ANCEL - Nouveaux outils de diagnostic et pronostic moléculaires des brûlures radiologiques par approche « multi-omique ».

Mahinour MOBASHER - Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens.

Quentin TALLON - Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques. Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH.

Manon GUILLOU - Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle.

12 h 00 - 13 h 30 › Déjeuner

13 h 30 - 14 h 30 Salle Frédéric Mistral SESSION POSTERS

14 h 30 - 15 h 45 Salle Camargue

› Dispersion atmosphérique et dépôt des radionucléides **Page 81**

Présidente : Irène KORSAKISSOK
Chercheuse en physico-chimie de l'atmosphère (PSE-SAN / SESUC / BMCA)

Youness EL-OUARTASSY - Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejets accidentels dans l'atmosphère.

Hanane BOUNOUAS - Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti.

Déo Gratias Kily SOURABIE - Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie.

Emmanuel REYES - Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : Modélisation explicite du flux de Stefan et de la contribution de la diffusiophorèse.

14 h 40 - 15 h 45 Salle 3 Fontaines

› Comportement / Transfert des aérosols et des produits de fission **Page 87**

Président : Dr Philippe NERISSON
Chercheur (PSN-RES / SEREX / L2EC)

Mariam SAAB - Remobilization of fission products (FPs) impacting the delayed source Term.

Rémy PLOIX - Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosols dans les bifurcations des réseaux de ventilation.

Julie NGUYEN SADASSIVAME - Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares (Xe, Kr) par des matériaux poreux innovants de type Metal-Organic Framework (MOF).

Karim ABBAS - Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés.

15 h 45 - 16 h 15 › Pause café

16 h 15 - 17 h 05 Salle 3 Fontaines SESSION PLÉNIÈRE

› Expérimentation et modélisation du combustible en conditions accidentelles **Page 93**

Président : Marc BARRACHIN
Adjoint au chef de service des accidents majeurs (PSN-RES / SAM)

Apou Martial KPEMOU - Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5-Framatome après une sollicitation de type APRP.

Théo ROUBILLE - Étude théorique de la microstructure et du comportement des produits de fission dans le combustible d'oxyde d'uranium dopé à l'oxyde de chrome.

Jinjiang CUI - Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF (*Accident Tolerant Fuel*).

19 h 30 - 21 h 00 › Gala de clôture

À partir de 21 h 00 › Soirée festive (ADiN)

› Vendredi 31 mars

07 h 30 - 08 h 15 › Transfert en car vers la gare de Montpellier St-Roch

Mercredi 29 mars

08 h 30 - 09 h 35 Salle 3 Fontaines

CARACTÉRISATION, DÉTECTION ET MODÉLISATION D'UN BÉTON VIEILLI

Président : Gauzelin BARBIER
Responsable programme R&D Vieillissement des matériaux
(PSN-RES)

Sirine AL DANDACHLI - Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales.

Lucie GOMEZ - Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradations des granulats lors d'une alcali-réaction.

Rita TABCHOURY - Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons.

Klayne DOS SANTOS SILVA - Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non-destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation expérimentale et numérique par changement d'échelles du comportement mécanique des bétons atteints de réaction sulfatique interne avec prise en compte des propriétés interfaciales

Doctorante :	Sirine AL DANDACHLI
Date du début de la thèse :	13 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Céline PELISSOU
Direction de thèse :	Moulay Saïd EL YOUSSOUFI / Université de Montpellier
École doctorale :	Montpellier - Information, Structures, Systèmes (I2S) - ED 166
Financement de la thèse :	IRSN

Le vieillissement des matériaux cimentaires des centrales nucléaires est l'un des axes de recherche de l'IRSN au travers du consortium scientifique CONCRETE et du projet ODOBA. Les sollicitations thermo-hydro-chimio-mécaniques que subissent les bétons des centrales nucléaires tout au long de leur durée de vie provoquent leur dégradation, en diminuant leur temps d'exploitation et leur durabilité (tenue mécanique, étanchéité). L'une des pathologies de vieillissement du béton est la Réaction Sulfatique Interne (RSI), qui fait l'objet de ces travaux de thèse.

Cette thèse, réalisée dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN/CNRS/Univ. Montpellier) vise à améliorer la compréhension et la modélisation multi-échelle des mécanismes engendrés par la RSI, en partant de l'échelle de l'interface pâte de ciment/granulat (échelle dite locale) et en remontant à l'échelle de l'éprouvette (échelle dite mésoscopique où la microstructure du béton est composée d'une collection de granulats noyés dans une matrice cimentaire).

À l'échelle locale, des essais mécaniques (traction, cisaillement et flexion trois points) sont réalisés sur des matériaux sains et atteints de RSI afin de caractériser le comportement mécanique d'une pâte de ciment et de l'interface pâte de ciment/granulat. À cette échelle, les gonflements induits par la RSI sont mesurés à l'aide d'un microscope numérique. En parallèle, des investigations numériques et expérimentales sont conduites pour évaluer la propagation de fissures en mode mixte à l'échelle locale du béton. Une méthodologie originale, basée sur des éprouvettes composites ciment/granulat en flexion centrée-excentrée, est ainsi mise en œuvre afin d'identifier les paramètres du modèle interfacial qui permettra, sur la base de constations expérimentales, une modélisation de la fissuration avec des éléments cohésifs-volumiques.

Mots clés : béton, réaction sulfatique interne, modèle de zones cohésives, fissuration.

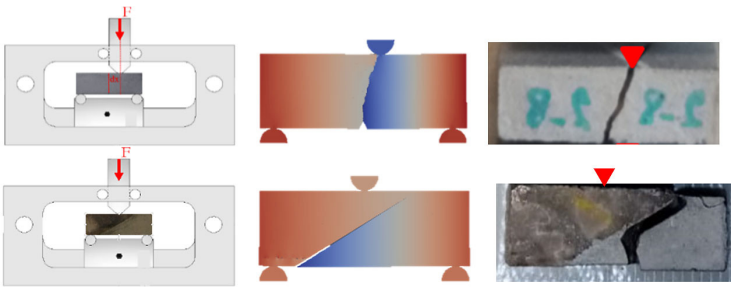


Figure 1 : résultats expérimentaux (profils de rupture) et numériques (profils de rupture et champs de déplacement) de l'essai de flexion trois points sur des éprouvettes pâte de ciment (en haut) et composites (en bas) à l'échelle locale.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisations expérimentale et numérique des mécanismes de dégradations des granulats lors d'une alcali-réaction

Doctorante :	Lucie GOMEZ
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Frédéric PERALES
Direction de thèse :	Stéphane MULTON / INSA Toulouse & Benoit FOURNIER / Université de Laval
École doctorale :	Toulouse 3 - Mécanique Énergetique Génie Civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & Hydro-Québec

Le sujet de thèse s'inscrit dans la question 6 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN : avec quel niveau de précision les caractéristiques des fuites de l'enceinte de confinement en cas d'endommagement de celle-ci sont-elles connues ?

L'objectif est l'évaluation de la potentielle perte des propriétés nécessaires au service des structures massives, telles que l'enceinte de confinement en béton des réacteurs nucléaires, due au développement de réactions alcali-granulats (RAG). Cette réaction est liée à l'attaque chimique des granulats (silice réactive) par la solution basique du béton (ions hydroxyles, alcalins et calcium de la solution interstitielle) entraînant la formation d'un gel expansif. Ce gel expansif peut entraîner un gonflement et conduire à la fissuration du béton. La cinétique des réactions étant lente, le diagnostic de la RAG est souvent tardif avec une fissuration avancée se manifestant à l'échelle macroscopique.

La cinétique de la réaction dépend principalement de la réactivité des granulats pilotant la dissolution de la silice. Une évaluation quantitative de la cinétique de la réaction est donc primordiale mais, compte tenu de sa dépendance à la minéralogie et aux réactions chimiques, reste un verrou scientifique à l'heure actuelle.

Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu, un modèle numérique de transport réactif (prenant en compte la diffusion et la chimie) a été mis en place. Ce modèle a permis de retrouver les observations expérimentales (gels se formant à l'interface et à cœur du granulat). Une étude paramétrique sur l'influence des différents paramètres initiaux, généralement mal connus, est en cours.

Afin d'évaluer quantitativement les paramètres du modèle, une étude expérimentale a été initiée et sera poursuivie en deuxième année. Cette étude repose d'une part sur des essais chimiques de diffusion afin de quantifier les coefficients de diffusion et la porosité, de dissolution afin d'évaluer le coefficient cinétique de dissolution, des essais d'expansion sur mortier et béton (en cours), et d'autre part des essais mécaniques de résistance en compression et en traction (prévu pour l'hiver). Notons que les essais de dissolution et de diffusion ne sont pas normalisés pour les granulats et implique la mise en place d'un protocole expérimental spécifique.

Enfin, en troisième année, des simulations chimio-mécaniques, couplant le modèle de transport réactif et la mécanique, seront effectués afin d'évaluer d'une part l'impact de la fissuration sur le transport réactif et d'autre part l'expansion mécanique due à la réaction.

Mots clés : béton, RAG, fissuration.

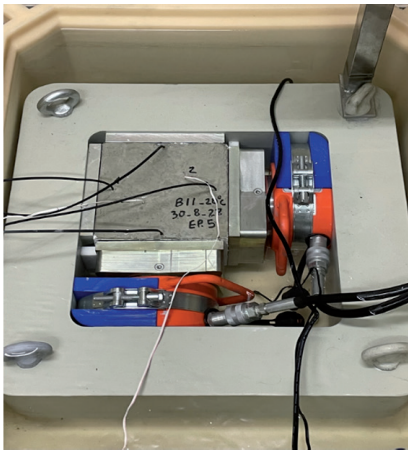
SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale et modélisation des effets de la précontrainte sur le développement des réactions de gonflement interne des bétons

Doctorante :	Rita TABCHOURY
Date du début de la thèse :	20 / 09 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	Georges NAHAS
Direction de thèse :	Stéphane MULTON / INSA Toulouse
École doctorale :	MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés
Financement de la thèse :	IRSN & H2020 ACES

Les réactions de gonflement interne (RGI) peuvent se développer dans les structures massives en béton comme les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires. Ces réactions physico-chimiques provoquent une expansion du béton conduisant à sa fissuration. Pour améliorer leur étanchéité, les enceintes de confinement sont précontraintes bi-axialement à l'aide des câbles en acier. L'état de contrainte de compression biaxiale engendre des déformations différées de fluage dans le béton et limite les expansions des RGIs dans les directions chargées. L'évolution des déformations dans la 3e direction, libre de chargement, est en revanche peu étudiée. L'objectif de cette étude est de caractériser les évolutions dans le temps des déformations du béton suivant les directions chargées et libres susceptibles de développer des RGIs.

Dans le cadre du projet européen H2020/ACES et du consortium CONCRETE, ce travail s'appuie sur un programme expérimental dans des conditions représentatives de celles des enceintes de confinement pour fournir des données représentatives de la situation opérationnelle afin de mieux appréhender les phénomènes et d'améliorer les modèles de simulations numériques. Plusieurs configurations de chargement sont prévues avec des cas de chargement de compression uniaxiale et biaxiale avec des contraintes de 8,5 MPa et 12 MPa correspondant à celles induites dans les enceintes de confinement. Huit bâtis de fluage biaxial ont été conçus pour appliquer un état de contrainte de compression biaxiale. Compte tenu de ces conditions d'essais et de la fiabilité requise durant la longue durée des essais, le choix du système d'extensométrie s'est porté sur la mesure par fibre optique. Les mesures seront ensuite analysées et des simulations avec le modèle de couplage fluage/RGI seront réalisées pour vérifier la capacité de ce dernier à reproduire les comportements observés. Un dernier travail consistera à simuler le comportement à long terme d'une enceinte de confinement supposée atteinte par une RGI au cours de son exploitation.



Bati de fluage biaxial

Les premiers essais de fluage biaxial ont été réalisés à 20°C et 38°C sur un béton atteint de réaction sulfatique interne et un béton de référence de même formulation. Les premiers résultats montrent une déformation de fluage plus élevée pour les éprouvettes traitées thermiquement. Ceci est notamment dû à la différence du taux de chargement de l'éprouvette correspondant au rapport entre la contrainte appliquée et la résistance en compression du béton, puisque cette dernière est différente entre les deux bétons. Ceci dû à l'effet de la température du traitement au jeune âge sur la microstructure du béton.

Mots clés : réactions de gonflement interne, fluage biaxial, fibre optique.

SUJET DE LA THÈSE

Transposition à grande échelle d'une méthode de contrôle non-destructive ultrasonore des bétons – tomographie non linéaire d'un bloc massif sur la plateforme expérimentale ODE

Doctorant :	Klayne DOS SANTOS SILVA
Date du début de la thèse :	20 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Benoit DURVILLE
Direction de thèse :	Vincent GARNIER / AMU
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & région PACA

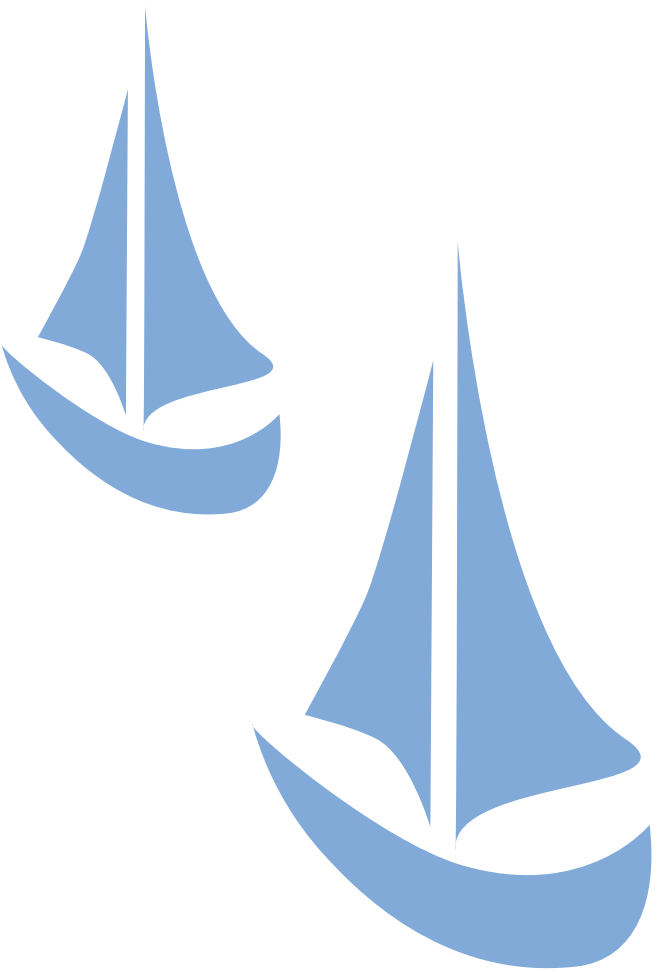
Les Réactions de Gonflement Interne (RGI) sont des pathologies qui peuvent conduire à une expansion et, par conséquent, une fissuration progressive du béton, réduisant ainsi la durabilité des structures. Dans le cadre d'une approche de prédiction et de suivi de ces pathologies, il est donc nécessaire de mettre en œuvre des systèmes capables de détecter de manière précoce l'apparition de ces pathologies, de les caractériser et les localiser pour faire le lien avec les futurs outils prédictifs.

En ce qui concerne les centrales nucléaires, le béton armé et précontraint de l'enceinte constitue la troisième barrière de confinement et la protection mécanique vis-à-vis des agressions externes. De ce fait, le carottage est proscrit et le développement de techniques de contrôles non-destructifs (CND) est nécessaire au suivi en service, dans le cadre de l'extension de durée de fonctionnement souhaitée par l'exploitant.

Les études précédentes (thèse et post-doctorat de Florian OUVRIER-BUFFET 2016-2021) ont démontré en laboratoire l'efficacité des CND ultrasonores, pour détecter en profondeur les propriétés non-linéaires inhérentes aux zones susceptibles d'être affectées par une pathologie. En effet, soumis à des oscillations basses fréquences, le matériau béton acquiert des propriétés non linéaires, qui évoluent significativement lorsque le matériau se fissure, notamment en cas de réaction alcali-granulat (RAG).

Ce sujet de thèse est fait en coopération avec le LMA et l'industriel MISTRAS. Il est lié au volet 3 du consortium CONCRETE qui vise à proposer des solutions pour l'auscultation non destructive des structures en béton, un objectif encouragé par l'HCERES. En fin de première année, la thèse a porté sur l'échelle du laboratoire qui s'étendra jusqu'à juin 2023 pour mettre au point un moyen de contrôle non destructif sur site, en se focalisant sur la détection précoce de pathologie RAG. Les essais se poursuivront par une démonstration de faisabilité sur un bloc massif (4 m^3) sujet à la RAG (programme ODOBA : Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé). La méthode sera calibrée par comparaison à d'autres techniques de mesures telles que les cordes vibrantes et les fibre optiques mesurant le niveau d'expansion mais aussi la présence de fissuration. Le travail s'appuiera sur la focalisation des ondes et la décorrélation des signaux coplanaires, en intégrant les contraintes de fonctionnement hors laboratoire, afin de transposer la méthode retenue à grande échelle. A terme, on vise à fournir une tomographie non-linéaire du bloc massif pourvu de zones différentes : saines ou dégradées par la RAG.

Mots clés : Réactions de Gonflement Interne, béton armé, contrôle non-destructif, acoustique.



Mercredi 29 mars

08 h 40 - 09 h 35 Salle Camargue

PROCESSUS DE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

Président : Olivier RADAKOVITCH
Chargé d'études en sciences de l'environnement
(PSE-ENV / SRTE / LRTA)

Zeinab MAWASSY - Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire de radionucléides sous forme particulaire.

Thomas SEYER - Modélisation du transfert des radionucléides dans le Golfe du Lion.

Léonore FLIPO - Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide/liquide de radionucléides dans les fleuves.

SUJET DE LA THÈSE

Analyse et modélisation des processus de transfert aux végétaux par voie foliaire de radionucléides sous forme particulaire

Doctorante :	Zeinab MAWASSY
Date du début de la thèse :	16 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LR2T
Référent IRSN de la thèse :	Pascale HENNER
Direction de thèse :	Jérôme ROSE / CNRS
École doctorale :	Aix-Marseille Université - SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN

Radioactive particles are among the emitted species in the atmosphere after a nuclear release that can deposit and transfer to plants. Particles in the nanometric size range would have different behaviour from micrometric or ionic species regarding incorporation and translocation within plants. The extent of particles transfer into plant resulting from particle-plant interactions will depend on both the properties of particles (size, charge) and the plants characteristics (waxy surface, stomatal count, pore sizes in biological barriers). Currently, there is a lack of quantification of particles fluxes at different transfer levels into plants (retention, incorporation and translocation). This questions the accuracy of current operational tools in predicting particles fluxes distribution within plants. Thus, in my research the first step would be to acquire data on the retention, incorporation and translocation of different sized particles ranging from 10 nm to 1 µm applied on morphologically two different plants (radish and lettuce). The second step would be to assess the adequacy of operational tools in current and future exposure prognosis, by comparing their outputs with those of newly acquired data and evaluate if any specific improvement is needed.

CeO_2 particles, used as proxi, were tested for their main properties, including aggregation (DLS) at concentration 20 mg/L, zeta potential (electrophoretic mobility), isoelectric point, crystallinity (XRD), primary size and chemical signature (TEM-EDX). Different particles sizes were characterized (10 nm, 50 nm and 1 µm particles), and have been then applied on plants. After selecting the suitable growth stages for both plants, assessing leaf surface features, base Ce concentration and stomatal state in day/night conditions, plant contamination experiments were launched. Suspensions were prepared in synthetic rainwater to simulate real case contamination. The initial particles concentration and volume to be applied on plants have been chosen to have significant difference compared to non-contaminated plants. First results confirmed the impact of the major controlled parameters: the different growth stages of plants induced different barrier thickness and internal translocated fluxes; different stomatal conductance under different light exposure can be used for tuning the leaf incorporation via stomatal/cuticular pathway; the effect of rain in particles leaching can be simulated by rinsing the leaves. Additional conditions are being tested to resolve mass balance recovery problems related to aggregation and successive pipetting for suspensions preparation. After protocol optimizations, we will measure fluxes and identify/localize particles in plant using analytical techniques at CEREGE (X-ray imaging techniques: XRF, nano/µ tomography and LA-ICP-MS) and IRSN (TEM-EDX).

Mots clés : foliar transfer, fine particles, operational model validation.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation du transfert des radionucléides dans le Golfe du Lion

Doctorant :	Thomas SEYER
Date du début de la thèse :	15 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Sabine CHARMASSON
Direction de thèse :	Sabine CHARMASSON / IRSN
École doctorale :	Aix-Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN & région PACA

En lien avec le quatrième point de la stratégie de recherche en radioprotection de l'IRSN (Plan à Moyen Terme 2019-2023), cette thèse propose une réponse à la problématique du transfert des radionucléides dans les chaines trophiques. L'importance de la contamination par voie trophique, dans le contexte post accidentel, a particulièrement été soulignée lors de l'accident de Fukushima, mettant en avant l'importance de l'étude des mécanismes à une échelle plus globale que celle souvent considérée en radioécologie. Cette étude suit donc une approche écosystémique, nécessaire pour caractériser les phénomènes entrant en jeu.

Le déroulement de cette thèse consiste en la construction du modèle GOLEM (*Gulf Of Lion Ecopath Model*), basé sur le logiciel de modélisation écologique Ecopath. Ce modèle est constitué de trois modules principaux permettant une représentation dynamique et spatialisée de l'écosystème du Golfe du Lion (GoL). Un quatrième module est ensuite implémenté pour simuler la dispersion des radionucléides au sein de ce système. L'objectif final de cette thèse est de formuler différents scénarios accidentels et d'étudier le devenir des radionucléides rejetés dans le réseau trophique du GoL.

Le premier module présenté (Ecopath) est une représentation statique à l'équilibre du modèle. Constitué de 68 groupes fonctionnels, basé sur environ 200 espèces, il est la structure de base pour le reste de GOLEM et a permis la production de résultats sur la caractérisation de l'écosystème du GoL. Cela inclut notamment un diagramme du réseau trophique, une représentation des flux de matière au sein de l'écosystème et une matrice d'impact, permettant la compréhension de l'effet, positif ou négatif, d'un groupe sur la biomasse d'un autre.

La mise en place du module Ecosim, rendant le modèle dynamique, est ensuite détaillée. Il est basé sur l'utilisation, en forçage, de 5 séries temporelles de biomasses planctoniques ainsi que 46 de captures et, en référence, 33 séries de biomasses (tous groupes confondus). Le processus de calibration/validation de la simulation est également discuté.

Pour la mise en place du module Ecotracer, une base de données des paramètres radioécologiques a d'abord dû être créée à partir de la littérature. Le module a ensuite été calibré sur les mesures issues du rapport de l'IRSN sur le Constat Radiologique Méditerranéen.

Pour finir, l'avancée des travaux sur le module Ecospace, responsable de la spatialisation de GOLEM, est présentée. Chargé de distribuer la biomasse calculée par les autres modules dans l'espace, il s'appuie sur des cartes de paramètres environnementaux qui seront détaillées.

Mots clés : modélisation, transfert, radionucléides, Ecopath, radioécologie, Golfe du Lion.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation de la dynamique de fractionnement solide/liquide de radionucléides dans les fleuves

Doctorante :	Léonore FLIPO
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Olivier RADAKOVICH
Direction de thèse :	Olivier RADAKOVICH / IRSN
École doctorale :	AMU - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Le transfert et le devenir des radionucléides rejetés dans les fleuves par les installations nucléaires sont conditionnés par la répartition de leur activité entre les phases dissoute et particulaire. Ce fractionnement solide/liquide est couramment défini par un coefficient empirique appelé Kd et son utilisation dans les modèles numériques suppose une répartition solide/liquide à l'équilibre, instantanée et réversible. Cependant, ces hypothèses peuvent être non vérifiées lorsque les temps de résidence des radionucléides sont courts (comme dans les rivières), que les propriétés physico-chimiques du milieu sont modifiées (zones de confluences) ou suivant l'âge de la contamination de la particule (effet de vieillissement).

L'objectif de la thèse est d'évaluer si des modèles de transfert intégrant une ou plusieurs cinétiques pour décrire ce fractionnement permettent des estimations plus fines et plus réalistes qu'une approche à l'équilibre. Il s'agit dans un premier temps de produire des données expérimentales en laboratoire caractérisant la dynamique de ce fractionnement solide/liquide pour ensuite paramétriser et comparer différents modèles couplant, ou non, équilibre et cinétique(s). Des scénarios tests et des analyses de sensibilité seront ensuite effectués en intégrant les différentes approches de modélisation dans des modèles de transfert globaux développés par l'IRSN (CASTEAUR-X) et EDF (MERLIN-EXPO).

La première année de thèse a permis le développement d'un protocole expérimental d'adsorption et de désorption de radionucléides sur des matières en suspension (MES) issues du bassin versant du Rhône (Figure). Les radionucléides (RN) d'intérêt sont le ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{54}Mn et ^{110m}Ag car ils peuvent être présents dans différents types de rejets liquides en fleuve. La physicochimie des MES et de l'eau prélevées *in situ* est systématiquement caractérisée. Une première série d'expériences a été conduite afin d'optimiser le protocole expérimental, notamment en termes d'activité de la contamination et de charge en suspension. Les premiers résultats révèlent plusieurs cinétiques du transfert des RN entre les phases solide et liquide, et l'équilibre n'est pas atteint après 14 jours. À la suite de la validation du protocole et des premiers résultats de modélisation obtenus, une deuxième série d'expériences d'une durée de deux mois a été réalisée avec différentes MES.

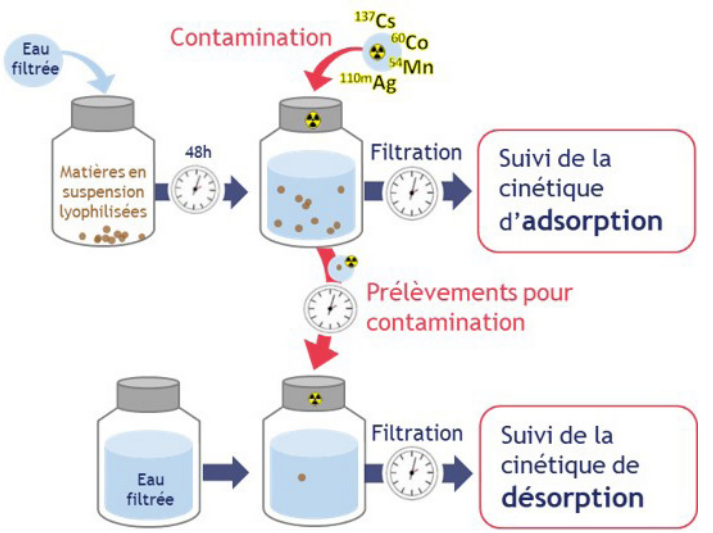


Figure : Schéma expérimental du suivi en batchs fermés et agités des cinétiques d'adsorption et de désorption de ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{54}Mn et ^{110m}Ag sur des matières prélevées en fleuves.

Mots clés : transfert, radionucléides, rivières, matières en suspension, cinétique, adsorption, désorption.

Mercredi 29 mars

09 h 40 - 10 h 30 Salle Camargue

VIEILLISSEMENT ET SURVEILLANCE DES MATÉRIAUX DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE DÉCHETS RADIOACTIFS

Président : Dr Jean-Michel MATRAY
Ingénieur-chercheur, spécialiste des transferts de radionucléides dans la géosphère (PSE-ENV / SEDRE / LETIS)

Rémy HOARAU BELKHIRI - Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme.

Jad EL ALAM - Spectral Induced Polarization (SIP) monitoring of swelling clays: A case study of the Modern2020 *in situ* tests at the Underground Research Laboratory in Tournemire.

Mohamed Haythem BAHLOULI - Analyse des incertitudes issues de la modélisation couplée HM Gaz à grande échelle dans une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs.

SUJET DE LA THÈSE

Impact de l'irradiation au très jeune âge des matrices cimentaires sur leur comportement chemo-mécanique à moyen terme

Doctorant :	Rémy HOARAU BELKHIRI
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Mejdi NEJI & Alexandre DAUZERES
Direction de thèse :	Stéphane POYET / CEA
École doctorale :	Paris-Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

Les matériaux cimentaires sont communément utilisés comme matrice de conditionnement de déchets radioactifs de faible et moyenne activité ; ce processus implique l'exposition de la matrice d'immobilisation aux rayonnements ionisants pendant la prise du liant hydraulique. Actuellement, les quelques données disponibles dans la littérature ne permettent pas de statuer sur un potentiel effet de l'irradiation sur l'hydratation de la matrice cimentaire. L'IRSN s'intéresse par conséquent à l'évaluation de l'impact d'un tel phénomène sur les propriétés chémo-mécaniques du matériau durci.

Dans cette étude, des pâtes pures de silicate tricalcique (C3S-H) et de ciment Portland (CEM I) en cours d'hydratation ont été soumises à un rayonnement gamma, pour un débit de dose de 2,5 kGy/h, pendant 14 jours et à une température de 35°C. La minéralogie, les propriétés mécaniques et la microstructure de chaque matériau ont ensuite été déterminées et systématiquement comparées à deux pâtes témoins analogues, curées respectivement à 20 et 35°C. La minéralogie a été étudiée par RMN, ATG et analyses DRX ; les propriétés mécaniques ont été mesurées par nanoindentation, tandis que la porosimétrie Hg et l'adsorption d'azote ont été utilisés pour les analyses microstructurales.

Les premiers résultats suggèrent que l'impact de l'irradiation gamma sur les propriétés de ces matériaux se limite à une élévation de la température, induisant une augmentation de la cinétique d'hydratation. Néanmoins, des analyses RMN 29Si de polarisation croisée mettent en évidence une quantité d'eau liée moins importante sur la phase majoritaire des pâtes de C3S irradiés, le silicate de calcium hydraté (C-S-H), par rapport à son analogue non-irradié. Enfin, les mesures portant sur la microstructure de ces mêmes échantillons révèlent une diminution de la porosité capillaire accessible, suggérant une quantité moindre d'eau libre pendant la prise des matériaux, un comportement semblable ayant été identifié sur les pâtes de ciment Portland.

La phénoménologie responsable n'est pas encore clairement définie, bien qu'une contribution accrue de la radiolyse sur un système riche en eau pourrait être mise en cause. Des investigations visant à confirmer ces résultats sont en cours, sur des matériaux similaires ayant été irradiés pendant 28 jours.

Mots clés : irradiation, hydratation, ciment, immobilisation, déchet radioactif.

SUJET DE LA THÈSE

Spectral Induced Polarization (SIP) monitoring of swelling clays: A case study of the Modern2020 *in situ* tests at the Underground Research Laboratory in Tournemire

Doctorant :	Jad EL ALAM
Date du début de la thèse :	04 / 01 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Pierre DICK
Direction de thèse :	André REVIL / CNRS
École doctorale :	Grenoble-Alpes - École doctorale sciences et ingénierie des systèmes, de l'environnement et des organisations (SISEO) - ED 489
Financement de la thèse :	IRSN

Bentonite clay seals are foreseen to be used as part of the engineered barrier system for nuclear waste repositories because of their high swelling ability and low permeability, which should ensure that diffusion will be the dominant transport mechanism in the barrier. Understanding the evolution of the bentonite's petrophysical parameters through time, such as water content, porosity, dry density, and permeability is a vital element in monitoring its confining capacity and thus, supporting post closure safety by guaranteeing that these parameters evolve favorably towards a predicted state. Direct monitoring methods have widely been used to survey the various components of engineered barriers. However, these techniques present several drawbacks such as limited coverage and preferential pathways. The aim of this work is to assess the sensitivity of an indirect geophysical technique, called Spectral Induced Polarization (SIP), to monitor the evolution in saturation of bentonite seals using a mechanistic model that will be validated at mock-up, and field scales.

The project is divided into three main phases: I) developing a physical model at a laboratory scale (5x5 cm) to bridge the gap between electrical measurements and petrophysical parameters (for two types of bentonites with varying sand contents and pore water chemistry); II) validating the model on four mock-up scale experiments (66x10 cm) implemented at IRSN's Tournemire Underground Research Laboratory (URL). First results should be acquired by February 2023 and processed by April 2023); and finally, iii) upscaling to a metric scale (60x4000 cm) on two *in situ* experiments at the Tournemire URL (acquisition between May-June 2023 and processing/interpretation between July-August 2023).

The preliminary results indicate that the SIP method can be used, with relative accuracy, to measure the evolution in saturation for different types of bentonite seals. We present in Figure 1 an example of SIP data on three bentonite cores made of pure bentonite. The relationship between in-phase conductivity, representing conduction, and quadrature conductivity, representing capacitance, is now known for bentonites between 1 Hz and 45 kHz. The main issue encountered is that the project timeline is behind schedule, as phase II was already planned to be completed by mid-2022.

Mots clés : géophysique, bentonite, géo-électrique, surveillance.

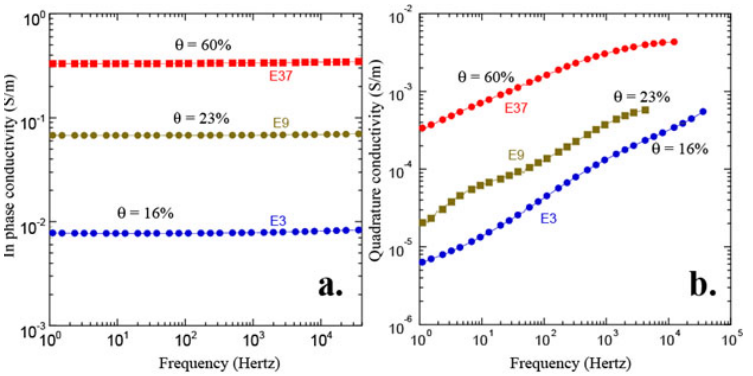


Figure 1: In-phase and quadrature conductivity spectra of three core samples (E3, E9 and E37) characterized by distinct water contents (here expressed in Vol.%).
a. In phase conductivity spectra.
b. Quadrature conductivity spectra.

SUJET DE LA THÈSE

Analyse des incertitudes issues de la modélisation couplée HM Gaz à grande échelle dans une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs

Doctorant :	Mohamed Haythem BAHLOULI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / UEMIS
Référent IRSN de la thèse :	Zakari SAADI
Direction de thèse :	Rachid ABABOU / INP Toulouse
École doctorale :	Toulouse 3 - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - ED 173
Financement de la thèse :	IRSN

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche que mène l'IRSN autour du stockage géologique profond des déchets radioactifs à haute activité HA et MAVL dans une couche d'argilites du Callovo-Oxfordien (projet Cigéo). Dans l'argile du Callovo-Oxfordien ainsi que dans les barrières ouvragées d'une installation de stockage (bentonite, béton...), des phénomènes de transport de gaz (hydrogène généré par corrosion) en milieu poreux partiellement saturé sont susceptibles de se produire et ainsi perturber la roche et le réseau de galeries remblayées (i.e.,endommagement mécanique).

L'objectif de cette thèse est d'évaluer les effets simultanés d'une pression d'entrée non nulle et de la déformation géomécanique sur la migration de gaz durant sa phase de post-fermeture sur des périodes de centaines de milliers d'années.

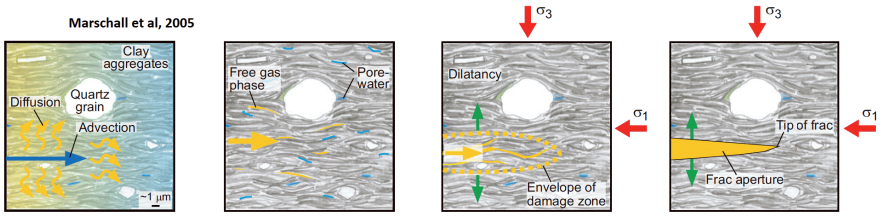
Le travail de thèse consiste à introduire le couplage hydromécanique (HM) dans la modélisation des interfaces entre les scellements et la roche hôte en milieu poreux diphasique eau-gaz afin d'évaluer leur influence sur la pression de gaz et sur l'écoulement.

Une étude bibliographique sur les modèles de couplage hydromécaniques a été élaborée. Elle a permis de développer un modèle HM couplant la loi linéaire élastique (Loi de Hooke) pour les déformations mécaniques à un modèle d'écoulement diphasique liquide-gaz incluant la pression d'entrée établi précédemment (Amri, 2021). Le couplage HM est basé sur les travaux de Bishop (1959) et de Coussy (1991).

Actuellement, des cas tests d'injection de gaz sur des échantillons de matériaux argileux (perméamètre à gaz) ont été proposés et simulés par le code TOUGH2 afin d'étudier le comportement de leur propriétés hydrauliques locales (porosité, perméabilité...) lorsque celles-ci seront soumises à des sollicitations mécaniques. Des modèles analytiques seront également proposés pour faciliter l'estimation de ces propriétés par des méthodes inverses. Un travail est en cours pour résoudre numériquement les équations de couplage HM et leur implémentation dans une plateforme adéquate (*e.g.*, FEniCS, Castem...), ainsi que leur vérification par des solutions analytiques exactes et leur validation sur des expérimentations que l'on définira prochainement (EURAD, VSEAL...). Enfin, le code développé sera testé sur le cas d'un alvéole et d'un module HA de l'installation CIGEO (Saâdi, 2022).

Une autre étude pourra être réalisée durant la dernière année de thèse afin évaluer les incertitudes de la réponse des modèles de migration du gaz et de leur sensibilité par rapport à un ou plusieurs paramètres mal connus en utilisant des méthodes probabilistes (Ababou,2008).

Mots clés : déchets radioactifs, HM Gaz, stockage géologique, incertitudes, modélisation.



Advection & diffusion of dissolved gas — Visco-capillary flow of gas and water phase ("two-phase flow") — Dilatancy controlled gas flow ("pathway dilation") — Gas transport in tensile fractures ("hydro-/gasfrac")

Mercredi 29 mars

09 h 40 - 10 h 35 Salle 3 Fontaines

MODÉLISATION DE LA MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX RÉACTEURS

Président : Dr Jean DESQUINES
Ingénieur-chercheur
(PSN-RES / SEREX / LE2M)

Zafilaza Armi MANOROSOA - Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grains dans l'UO_2.

Loïc CHAIX - Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié.

Clément TOSI - Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l'UO_2 irradié.

SUJET DE LA THÈSE

Étude multi-échelle du phénomène de rupture des joints de grains dans l'UO_2

Doctorante :	Zafilaza Armi MANOROSOA
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Andrei JELEA & Frédéric PERALES
Direction de thèse :	Yann MONERIE / Université de Montpellier
École doctorale :	Université de Montpellier - Information, Structures, Systèmes (I2S) - ED 166
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

La thèse s'inscrit dans la question de la stratégie scientifique de l'IRSN *« Comment mieux caractériser et modéliser les phénomènes qui génèrent des contraintes thermomécaniques et chimiques sur la première barrière ou font évoluer ses modes de dégradation ou de ruine ? »*. Le relâchement des gaz de fission, suite à la rupture des joints de grains où ils se trouvent accumulés, joue un rôle prépondérant dans le chargement mécanique de la gaine lors d'un accident de réactivité. Afin de modéliser le processus de relâchement, une connaissance précise du seuil de rupture des joints de grains est donc nécessaire. Les valeurs seuils utilisées actuellement dans les codes de calcul thermomécanique tels que SCANAIR sont encore définies de manière empirique. Le but de cette thèse est l'obtention des paramètres mécaniques de rupture au niveau des joints de grains de l'UO_2, combustible utilisé dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée, avec une approche multi-échelle. A l'échelle atomistique, des calculs de dynamique moléculaire avec un potentiel semi-empirique à charges variables (SMTB-Q) sont menés. Ces calculs permettent l'obtention des grandeurs physiques caractérisant la rupture des joints de grains. Les paramètres obtenus à l'échelle atomistique alimentent des calculs mécaniques de rupture à l'échelle mésoscopique pour évaluer des critères de rupture utilisables dans les codes de calcul thermomécanique macroscopiques.

A l'échelle atomistique, l'étude a été axée sur l'analyse thermodynamique détaillée de trois systèmes de joints de grains représentatifs soumis à des essais de traction jusqu'à la rupture. Cette analyse a montré que le travail de séparation est la grandeur la plus appropriée pour caractériser d'un point de vue énergétique le processus de rupture. Le travail de séparation, étant une grandeur de parcours, dépend de la vitesse de déformation du système, tout comme les contraintes maximales atteintes lors de la traction. L'étude des cartes de variation d'énergie potentielle a montré que l'énergie de rupture est localisée autour des joints de grains subissant la décohésion. L'analyse structurale n'a pas mis en évidence la formation de nouvelles phases ou la nucléation de dislocations au niveau des joints de grains, la rupture étant de type fragile. A l'échelle mésoscopique, des calculs basés sur une approche cohésive-volumétrique à l'aide des notions de zone cohésive frottante (MZCF) et sur l'approche Non Smooth Contact Dynamics (NSCD) sont en cours. Les paramètres de zones cohésives et les propriétés volumiques utilisées dans les calculs mésoscopiques ont été obtenus à partir des résultats des calculs à l'échelle atomistique.

Mots clés : Dynamique Moléculaire, Modèle Zone Cohésive, Dioxyde d'uranium, Contrainte à rupture.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation micromécanique du comportement viscoplastique d'un polycristal : application au durcissement d'un acier irradié

Doctorant :	Loïc CHAIX
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Direction de thèse :	Mihail GARAJEU / AMU & Martin IDIART / Université Nationale de La Plata, Buenos Aires
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & ISFIN

Cette thèse concerne le vieillissement de la cuve dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée et est liée à la question de la stratégie scientifique de l'IRSN intitulée *« Comment évaluer de manière réaliste l'impact sur la sûreté des évolutions des caractéristiques des installations sur toute leur durée de vie ? ».* Durant sa vie en réacteur, la cuve reçoit une dose d'irradiation neutronique suffisamment importante pour générer des défauts cristallins dans sa microstructure (boucles de dislocations et amas de solutés [Churier-Bossenec *et al.*, 2011]). Une modification de son comportement mécanique est observée avec un durcissement et une fragilisation [Hure *et al*, 2015]. L'objectif est de proposer un nouveau modèle de comportement mécanique en viscoplasticité à l'échelle du polycristal, capable d'utiliser une loi de comportement cristalline (dans les grains) pour aciers de cuve irradiés.

Le premier point du programme de thèse consiste à implémenter la loi de plasticité cristalline (à base physique, dédiée aux aciers de cuve irradiés et basée sur [Monnet *et al.*, 2019]) dans un code de calcul à base de transformées de Fourier rapides appelé «CraFT» (développé au LMA, [Suquet *et al.*, 1998]). Le deuxième point consiste à mener avec CraFT une campagne de simulations «en champs complets» sur des microstructures polycristallines (utilisation des moyens de calcul du LMA) et de comparer les résultats numériques obtenus avec des résultats expérimentaux (essais de traction existants). Le troisième point consiste à établir un nouveau modèle de comportement à l'échelle du polycristal sur la base du modèle d'homogénéisation appelé «Fully Optimized Second-Order» (FOSO) de [Ponte Castañeda, 2015].

L'implémentation de la loi de plasticité cristalline dans CraFT a été effectuée (en langage C). La loi de plasticité a été calibrée, au travers de plusieurs paramètres (correspondant à des quantités difficilement mesurables). Deux études de convergence ont été menées (discrétisation spatiale et nombre de grains). La validation de la loi a été effectuée en confrontant des résultats issus d'une campagne de simulations sur CraFT à des résultats expérimentaux, pour quatre valeurs de température et trois familles d'état d'irradiation. L'implémentation de l'approche FOSO en langage C a été effectuée (point dur de la thèse) et sa validation est faite en retrouvant des résultats issus de la littérature. Actuellement, l'intégration de la loi cristalline dans l'approche FOSO est en cours (difficultés numériques dues à la forme de la loi de plasticité cristalline utilisée).

Mots clés : acier de cuve irradié, plasticité cristalline, polycristal, méthode à base de transformée de Fourier rapide.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation micromécanique de l'endommagement d'un matériau viscoplastique poreux par une approche cohésive-volumique : application à l'UO_2 irradié

Doctorant :	Clément TOSI
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Pierre-Guy VINCENT
Direction de thèse :	Yann MONERIE / Université de Montpellier
École doctorale :	Montpellier - Information, Structures, Systèmes (I2S) - ED 166
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre du questionnement scientifique formulé dans la question 5, sous-question 5.1, du domaine de la sûreté-sécurité de la stratégie scientifique de l'IRSN : « Comment mieux caractériser et modéliser les phénomènes qui génèrent des contraintes thermomécaniques et chimiques sur la première barrière ou font évoluer ses modes de dégradation ou de ruine ? ». L'objectif de ce travail de thèse estd'étendre les prédictions du code SCANAIR [Moal *et al.* 2014] développé à l'IRSN et destiné à la simulation des crayons de combustible nucléaire en situation d'accident d'insertion de réactivité (RIA- Reactivity Initiated Accident).

La première partie de la thèse consiste à établir un nouveau modèle surfacique de zone cohésive pour simuler la fissuration du dioxyde d'uranium (UO_2) lors d'un RIA. Ce modèle cohésif est issu de la projection surfacique du modèle de comportement volumique viscoplastique pour l'UO_2 de [Salvo 2014] (retenu pour sa pertinence sur de larges plages de températures et vitesses de déformation et pour sa dépendance à la porosité). La deuxième partie consiste à implémenter le modèle de zone cohésive dans les codes de calcul LMGC90 (développé au LMGC) [Dubois *et al.* 2011] et XPER (développé à l'IRSN et basé en partie sur LMGC90) [F. Perales *et al.* 2022]. Des essais de compression sur pastille d'UO_2 doivent être simulés et les résultats obtenus comparés avec des résultats expérimentaux de [Salvo 2014] pour validation du modèle (utilisation des moyens de calcul de l'IRSN). La troisième partie consiste à mener une campagne de calcul de simulation du gonflement-fissuration d'un fragment de pastille de combustible en RIA et les résultats obtenus doivent être comparés avec des résultats expérimentaux du programme CABRI-REP-Na.

Une étude bibliographique a permis de recenser les résultats sur le comportement viscoplastique et la rupture du combustible UO_2 sur une large plage de températures (20-2000°C). La projection du modèle de [Salvo 2014] a été effectuée en suivant la méthode de [Nkoumbou Kaptchouang 2019]. L'efficacité numérique du modèle a été analysée sur une formulation point (sous Python). Le modèle cohésif a ensuite été enrichi par l'ajout d'un critère énergétique pour détecter la rupture et par la prise en compte de la pression dus aux gaz de fission dans les cavités. La robustesse du modèle a été vérifiée par des calculs de faisabilité sur des structures pré-entaillées en traction. Le travail de simulation de l'essai de compression sur pastille est en cours.

Mots clés : micromécanique, endommagement, viscoplasticité, zone cohésive, dioxyde d'uranium.

Mercredi 29 mars

11 h 05 - 11 h 55 Salle 3 Fontaines

SESSION PLÉNIÈRE

PROCESSUS DE TRANSFERT DE L'URANIUM DANS LES SOLS

Présidente : Dr Laureline FEVRIER
Chercheuse
(PSE-ENV / SRTE / LR2T)

Tingting GENG - The use of stable lead isotopes for the identification of the sources and transport processes leading to the release of radioactive contaminants downstream of former uranium mine sites.

Séléna FERRERES - Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire.

Louise DARRICAU - Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères.

SUJET DE LA THÈSE

The use of stable lead isotopes for the identification of the sources and transport processes leading to the release of radioactive contaminants downstream of former uranium mine sites

Doctorante :	Tingting GENG
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Référent IRSN de la thèse :	Alkiviadis GOURGIOTIS
Direction de thèse :	Gilles MONTAVON / SUBATECH
École doctorale :	Université Bretagne Loire - Matière, Molécules, Matériaux - 3M - ED 596
Financement de la thèse :	IRSN & région Pays de Loire

Radioactive enriched materials generated by uranium mining activities release potentially radionuclides and associated heavy metals into the environment, leading to high uranium accumulation in soils and sediments around the former uranium mine. However, high uranium content comparable to that from mining activities, due to natural weathering and erosion of local bedrock was reported (up to 6000 $mg.kg^{-1}$). Thus, highlighting the potential sources and mechanisms driving radioactive elements dissemination in the vicinity of former U mines is a key element for the decision-making process, the effective management and remediation of contaminated sediments and soils. This research aims to identify the sources of radioactive contaminants and their transport mechanism by using stable Pb isotopes and radioactive disequilibrium of the ^{238}U-decay series.

The study area is a wetland located downstream of the former Rophin U mine (France), considered as a uranium observatory (ZATU). Soils and sediments were sampled in the wetland and radiological and chemical analysis were performed at the IRSN's two interdisciplinary platforms PATERSON and LUTECE. Moreover, *in situ* mobile gamma measurements were performed and data were treated using geostatistical tools.

The uranium content here reaches to a maximum of 16 000 $mg.kg^{-1}$ in surface organic layer (34 $mg.kg^{-1}$ in local bedrock). The radiogenic $^{206}Pb/^{207}Pb$ ratio (~1,73 vs local background ~1,20) and the alignments of soil samples in the three Pb isotopes plot point out the impact of mining activities in this area. Uranium in different layers originate probably from three principal sources related to mining history of the site: i) pitchblende UO_2 due to mechanical and chemical processing of Bois Noirs U ore, ii) parsonsite $Pb_2(UO_2)(PO_4)_2$, the local dominant U mineralization and iii) U from local geochemical background. The high content of common Pb in parsonsite hide its radiogenic Pb signature limiting thus the use of the Pb isotopes as a relevant fingerprint for this case. Moreover, observations of Pb bearing phases associated with phosphate by SEM strengthen our hypothesis and also indicate the potential mobility of uranium in the wetland. Finally, a geostatistical approach was explored to highlight lateral radioelement mobilities at the wetland scale. Preliminary findings will be showed during the oral presentation.

Mots clés : radioactive contaminant, source identification, Pb isotopes, U mine area.

SUJET DE LA THÈSE

Effet des matières organiques et des micro-organismes sur les transferts d'uranium(VI) aux plantes : une approche moléculaire

Doctorante :	Séléna FERRERES
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LR2T
Référent IRSN de la thèse :	Laureline FEVRIER
Direction de thèse :	Mirella DEL NERO / CNRS-IN2P3
École doctorale :	Université de Strasbourg - Physique et chimie-physique - ED 182
Financement de la thèse :	IRSN & CNRS

L'objectif de ce travail de thèse est d'identifier, par des analyses à l'échelle moléculaire au cours d'expériences contrôlées en laboratoire portant sur des systèmes modèles, les mécanismes encore peu connus des actions-rétroactions entre uranium(VI), communautés bactériennes et matières organiques complexes (MO), - assemblages supramoléculaires de centaines de molécules organiques de propriétés et réactivité distinctes-, qui influencent la spéciation et les transferts de l'uranium(VI) dans les *continuums* eaux-sols-plantes de milieux à radioactivité naturelle renforcée.

Cette thèse s'inscrit dans l'étude des effets de la spéciation sur les distributions de radionucléides dans les écosystèmes de l'IRSN et du SRTE/LR2T. Elle fait partie du projet structurant NEEDS-INSPECT, en lien avec l'étude du site de l'ancienne mine d'uranium de Rophin étudiée dans la ZATU (Zone Atelier Territoires Uranifères), et particulièrement d'une zone humide avec un horizon de subsurface argileux marqué par de fortes concentrations en U (> 1000 ppm).

Afin d'établir les liens entre spéciation et biodisponibilité de l'U(VI) dans les continuums eaux-sols-plantes, la démarche est :

- d'identifier en laboratoire les espèces métallo-organiques aux interfaces U(VI) - minéral (oxyde de fer ou argile) - MO (de référence ou extraites de l'horizon) - bactéries (cultivées à partir de l'horizon) par l'utilisation de techniques avancées (*e.g.* spectrométrie ESI-FTMS, spectroscopie ATR-FTIR);
- de mettre en regard la spéciation de U(VI) avec des données méta-génomiques sur les communautés bactériennes et des mesures de transferts de l'U aux plantes (Rhizotests).

Des expériences ont été réalisées afin de quantifier la mobilité de l'U de l'horizon organique de surface et de l'horizon de sol argileux marqué, en fonction du pH et du seuil de filtration, en lien avec la composition de la MO désorbée. Les résultats montrent que la mobilité de l'U et de la MO sont influencées par le pH et la nature de l'horizon considéré et qu'à pH environnemental, la mobilité de l'U est associée à une fraction colloïdale de taille comprise entre 1 nm et 60 nm à laquelle est associée une fraction « humique » de la MO. Parallèlement, la MO des deux horizons a été extraite, puis caractérisée par fluorescence et ESI-FTMS. Les résultats de fluorescence montrent que la MO extraite est d'origine végétale dans les deux horizons, mais la MO de l'horizon argileux, dont la fraction « protéique » est majoritaire (> 50 %), est différente de celle de l'horizon de surface, dont la fraction « humique » est majoritaire (> 50 %). L'étude de systèmes modèles U(VI)-minéral-MO extraite permettra de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu aux interfaces U(VI)-minéral-MO de ces horizons.

Mots clés : spéciation, uranium, transferts, sols, plantes, bactéries, matière organique.

SUJET DE LA THÈSE

Spéciation et mobilité des éléments chimiques stables associés aux minéralisations uranifères

Doctorante :	Louise DARRICAU
Date du début de la thèse :	01 / 02 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LELI
Référent IRSN de la thèse :	Arnaud MANGERET & Josselin GORNY
Direction de thèse :	Alexandra COURTIN-NOMADE / Université Paris-Saclay
École doctorale :	Paris-Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

Entre 1948 et 2001, l'extraction des minerais d'uranium (U) en France a produit une grande quantité de déchets (résidus, stériles, etc.) contenant encore des minéraux riches en U et autres éléments traces (ET) initialement associés à la minéralisation. Malgré les opérations de réaménagement, certains ET comme l'U peuvent être relativement mobiles et redistribués dans les réservoirs de la zone critique tels que les zones humides. Ces zones humides, fréquemment riches en Matière Organique Particulaire (MOP), sont connues pour limiter la mobilité de nombreux ET (incluant U). Des variations significatives de niveaux de la nappe entrainant la modification des conditions physico-chimiques, notamment les propriétés redox, peuvent influencer leur mobilité. Ces dernières années, la multiplicité des événements de sécheresse a eu des conséquences en termes d'impact chimique sur les écosystèmes pouvant conduire à la modification de la capacité de ces zones humides à séquestrer les ET.

Afin de mieux comprendre les conséquences de ces futurs événements, l'étude de la spéciation et de la mobilité des ET dans des sols d'une zone humide affectée par d'anciennes activités d'extraction et de traitement d'U (Rophin, Massif-Central, France) a été réalisée. Différentes approches analytiques (MEB, EPMA, XAS, µ-DRX, lixiviation et extractions séquentielles BCR) ont été déployées sur des échantillons séchés en conditions atmosphériques.

Les premiers résultats montrent, à l'aide de l'indice de pollution Igeo, des apports anthropiques en U, Pb et Cu dans ces sols. Les niveaux de contamination les plus élevés sont liés à une couche blanchâtre héritée des anciennes activités minières uranifères. Le long du profil de sol, la spéciation solide du Pb semble principalement associée aux phosphates stables (plumbogummite - $PbAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$) hérités du granite régional et de la minéralisation initiale. Dans les couches anciennes et récentes riches en MOP, les processus de sorption sur celle-ci régissent principalement la spéciation des ET. Dans le dépôt blanchâtre, la spéciation solide de U, Cu et Pb semble régie par l'adsorption à la surface des particules et, dans une moindre mesure, par la précipitation de phases authigènes et/ou le dépôt de phases héritées (*e.g.* oxydes d'U, chalcopyrite - $CuFeS_2$, plumbogummite, anglésite - $PbSO_4$, hokutolite - $(Ba,Pb)SO_4$). Des tests de lixiviation et des extractions séquentielles ont mis en évidence une certaine mobilité des ET tels que Cu et U potentiellement impactant pour l'environnement. *In fine*, l'ensemble de ces résultats souligne des réactivités contrastées des phases porteuses très variées en ET dans des conditions oxydantes.

Mots clés : zone humide contaminée, lixiviation, extractions séquentielles, géochimie, minéralogie, uranium, ZATU, Rophin.

Mercredi 29 mars

14 h 30 - 15 h 35 Salle 3 Fontaines

SESSION PLÉNIÈRE

RADIOTOXICOLOGIE

Président : Dr Stéphane GRISON
Chercheur
(PSE-SAN / SESANE / LRTOX)

Pierre TECHER - Comprendre la réponse adaptative des *Daphnia Pulex* de la zone d'exclusion de Tchernobyl.

Théo FRECHARD - Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale *in vivo* chez le rat.

Florian SALIOU - Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de trouble du rythme et autres pathologies cardiaques à long terme.

Goran RIAZI - Impacts d'irradiations uniques de rayons X sur des modèles murins de développement d'anévrisme aortique.

SUJET DE LA THÈSE

Comprendre la réponse adaptative des *Daphnia Pulex* de la zone d'exclusion de Tchernobyl

Doctorant :	Pierre TECHER
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Référent IRSN de la thèse :	Frederic ALONZO
Direction de thèse :	Stuart AULD / University of Stirling, Stirling
École doctorale :	Aix-Marseille Université - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN

La compréhension des effets à long terme de faibles doses de rayonnements ionisants sur les écosystèmes et les espèces qui les composent reste un enjeu majeur en écotoxicologie des radionucléides. Dans ce contexte, un défi de la recherche est de caractériser l'état des populations sauvages vivant dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (CEZ). La biologie évolutive établit que la réponse d'une population exposée à un contaminant (radiologique ou chimique) est de nature adaptative et s'opère par la sélection naturelle des individus les plus aptes à faire face au stress toxique. Cette capacité définie comme la valeur sélective (fitness) peut être évaluée en suivant la survie et la reproduction, deux traits d'histoire de vie critiques pour la dynamique de population.

Récemment, Goodman *et al.* (2019, 2022) ont étudié les populations de *Daphnia pulex*, une espèce de crustacé planctonique clé de voute des écosystèmes lentiques, issues de différents étangs de la CEZ. Les auteurs montrent que les populations exposées à des débits de dose allant de 0,01 µGy/h à 200 µGy/h ne présentent pas de différence significative en termes d'histoire de vie et de valeur sélective (définie par le nombre moyen de descendants par cycle de vie). L'analyse de la structure génétique des populations montre une diversité corrélée positivement au débit de dose, ainsi qu'une faible dérive génétique, ce qui réfuterait la possibilité d'un effondrement démographique récent. Ces observations suggèrent que les populations se seraient adaptées aux rayonnements ionisants au fil des décennies d'exposition depuis l'accident.

Ce projet de thèse vise à vérifier si les populations de *D. pulex* de la CEZ ont acquis une résistance accrue aux rayonnements ionisants. Pour ce faire, des individus issus des différents lacs seront irradiés pendant plusieurs générations sur une gamme de débits de dose variant de 6,5 µGy/h à 35 mGy/h. Des mesures quotidiennes de la croissance, survie, et reproduction seront effectuées. Des observations en microscopie électronique testeront l'apparition d'altérations mitochondriales, afin de confirmer une éventuelle atteinte du métabolisme énergétique. Ces données seront analysées à l'aide d'un modèle toxico-cinétique toxico-dynamique (TKTD), basé sur la théorie du Budget Energétique Dynamique (DEB). Ce travail permettra de préciser la nature de la réponse adaptative développée par les individus de la CEZ.

Une première expérience a été effectuée dont les données sont en cours de traitement. Les premiers résultats soulignent la difficulté à trouver des conditions expérimentales assurant une bonne réplicabilité des réponses observées chez l'espèce.

Mots clés : *Daphnia pulex*, réponse adaptative, écotoxicologie des radionucléides, populations naturelles.

SUJET DE LA THÈSE

Effets d'une coexposition chimique et radiologique sur les paramètres de toxicité cérébrale *in vivo* chez le rat

Doctorant : Théo FRECHARD

Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2021

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SESANE / LRTOX

Référent IRSN de la thèse : Chrystelle IBANEZ

Direction de thèse : Dimitry KLOKOV / IRSN

École doctorale : Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569

Financement de la thèse : IRSN

Mon projet de thèse vise à caractériser si une irradiation externe à faible dose produit des effets différentiels sur le cerveau quand elle est associée à l'inhalation d'un aérosol particulaire de tungstène métal. Le choix des stresseurs, radiologique et chimique, est pertinent au regard de certaines activités professionnelles du nucléaire (réacteurs de fusion, démantèlement d'installations spécifiques). Notre sujet est donc en lien avec les questions 1 et 3 de la stratégie scientifique de l'IRSN.

Des rats mâles adultes sont exposés par inhalation à des particules de tungstène métal (80 $mg.m^{-3}$) durant 30 minutes et/ou une irradiation gamma corps entier (50 $mGy.min^{-1}$) durant 1 minute. Les temps d'analyse post-exposition sont 24 heures (24H) pour les effets à court terme, et 28 jours (28J) pour étudier leur évolution dans le temps.

Mon projet présente une organisation logistique particulière, les expositions par inhalation se faisant en boite à gants, suivies de la mise en œuvre d'un irradiateur. Cela a impliqué d'étaler notre campagne d'exposition de janvier à juillet 2022.

Nous avons initié nos études au niveau du cortex frontal et du bulbe olfactif par des marquages immunohistochimiques de types cellulaires particuliers comme la microglie (Iba1), les neurones matures et leur phénotype de souffrance (NeuN), certains phénotypes apoptotiques (Caspase 3 clivée) et les neurones chromatolytiques (coloration Crésyl Violet).

Nos résultats indiquent des modulations statistiquement significatives à 24H et 28J de certains phénotypes cellulaires chez les groupes coexposés par rapport aux groupes contrôles dans le cortex frontal :

- Augmentation de la densité cellulaire totale à 24H et 28J,
- Diminution à 24H puis augmentation à 28J de phénotypes de souffrance neuronale,
- Augmentation à 24H puis diminution à 28J de la densité microgliale.

Nous n'observons pas de modulation de la densité de neurones chromatolytiques. La mise au point d'une méthode de scoring dans les bulbes olfactifs a révélé une augmentation à 28J de la densité et de l'activation microgliale chez les groupes irradié et coexposé en comparaison au contrôle.

Nos résultats montrent, le plus souvent, des différences statistiquement significatives entre les groupes coexposés et les groupes contrôles et/ou exposés à un stresseur seul. Cela suggère un potentiel effet synergique de la coexposition. De plus, certains effets se maintiennent dans le temps.

Nos expérimentations se concentrent désormais sur l'expression génique et protéique de marqueurs impliqués dans l'inflammation, le stress oxydant et l'apoptose.

Mots clés : tungstène, irradiation, coexposition, neurotoxicologie, faibles doses, inhalation, *in vivo*.

SUJET DE LA THÈSE

Effets des doses faibles à modérées de rayonnements ionisants gamma sur le développement de trouble du rythme et autres pathologies cardiaques à long terme

Doctorant : Florian SALIOU

Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2021

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SESANE / LRTOX

Référent IRSN de la thèse : Virginie MONCEAU

Direction de thèse : Eric MOREL / Université Paris Saclay

École doctorale : Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569

Financement de la thèse : IRSN

Quelques études épidémiologiques se sont intéressées aux conséquences cardiaques induites par une exposition à de faibles doses de Rayonnements Ionisants (RI) ≤ à 500 mGy. Ces études ont permis d'identifier le développement de pathologies vasculaires et ischémiques. Concernant le développement d'arythmies, les études épidémiologiques restent contradictoires par manque d'études scientifiques visant à comprendre le mécanisme et le développement de ces pathologies. Ce projet de thèse répond à la question 1 de la stratégie scientifique de l'Institut sur les effets de faibles doses de RI sur le développement de pathologies non-cancéreuses comme les pathologies cardiovasculaires.

L'objectif de ce projet de thèse est de parvenir à une compréhension mécanistique des effets cardiaques à l'exposition aux RI de faibles doses par l'étude de la relation entre 2 structures biologiques interdépendants : le cœur et le système nerveux autonome cardiaque.

L'hypothèse de cette étude est qu'une exposition à une dose inférieure à 500 mGy de RI gamma induirait un remodelage tissulaire et nerveux du cœur conduisant au développement des troubles du rythme et de pathologies cardiaques à long terme. Afin de répondre à cette hypothèse, nous exposons des souris mâles C57BL6/J à des doses uniques et externes de Césium-137 (50-2000 mGy). Les temps 4h, 24h, 15j, 3 et 9 mois post irradiation sont étudiés afin de déterminer la cinétique de développement de pathologies cardiovasculaires. Les premiers résultats obtenus par Western-Blot sur le temps 4h post-exposition, montrent une diminution significative de protéines impliquées dans la transmission de l'influx nerveux (connexines ; 100 et 250mGy ; p-value<0,05) et du système nerveux (tubulin beta 3 et tyrosine hydroxylase ; 50 et 250mGy ; p-value<0,05) contrôlant l'activité cardiaque. A l'inverse, l'expression de ces protéines d'intérêts est augmentée à 3 mois post exposition (connexines ; 500mGy ; p-value<0,05). De plus, ces modifications de l'expression des protéines impliquées dans la régulation de l'activité cardiaque sembleraient être plus importantes dans les oreillettes et le ventricule droit. Ce qui pourrait aboutir au développement d'arythmies cardiaques.

La fonction cardiaque est en cours d'étude par échocardiographie doppler (temps 3 et 9 mois) et par la mesure de l'homéostasie calcique (cardiomyocyte isolé, temps 3 mois) dont le rôle est central dans la contraction cardiaque.

Mots clés : cœur, rayonnements gamma, système nerveux, faibles doses, dose unique.

SUJET DE LA THÈSE

Impacts d'irradiations uniques de rayons X sur des modèles murins de développement d'anévrisme aortique

Doctorant :	Goran RIAZI
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LRTOX
Référent IRSN de la thèse :	Teni EBRAHIMIAN
Direction de thèse :	Hafid AIT OUFELLA / INSERM
École doctorale :	Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

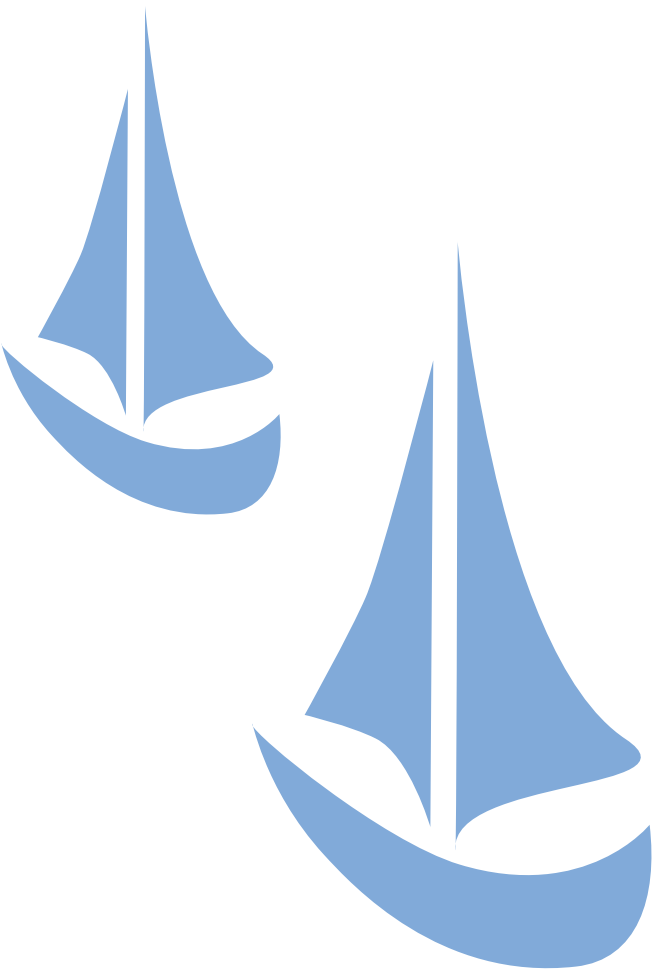
L'anévrisme aortique (AA) est l'une des pathologies cardiovasculaires les plus fréquemment rencontrées notamment chez les personnes âgées. Bien que cette pathologie soit asymptomatique dans la plupart des cas, son évolution telle que la rupture d'anévrisme entraîne de nombreux décès chaque année. Ce projet de thèse entre dans le cadre de la recherche des effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur les pathologies non-cancéreuses. L'objectif de cette étude est d'étudier par une approche *in vivo*, puis par la suite *in vitro*, la réponse d'une irradiation unique de rayons X avec une large gamme de doses sur le développement de la pathologie anévrismale.

Une première approche *in vivo* chez la souris nous a permis de mimer le développement d'anévrisme dégénératif qui est la forme d'AA la plus courante. D'abord avec un modèle de souris déficientes en Apolipoprotéine E (ApoE-/-) rendues hypertendues par supplémentation en angiotensine II ; ensuite avec un modèle de souris auxquelles une solution d'élastase est déposée localement sur l'aorte. Dans un second temps, l'étude de l'anévrisme aortique syndromique, une forme familiale de l'AA plus rarement rencontrée, nous a été rendue possible par l'utilisation d'un modèle de souris hypomorphes pour le gène FBN1 codant pour la fibrilline. Ces trois modèles murins ont été exposé à une large gamme de doses de rayonnements ionisants allant de 50 mGy à 5 Gy à différentes étapes de la pathologie.

Concernant l'étude des AA dégénératifs, les résultats montrent une réduction significative de la dilatation aortique pour les plus fortes doses sans effet sur la mortalité et une absence d'effets aux plus faibles doses. A l'inverse, l'étude des AA syndromiques confirme un ralentissement du développement de la pathologie avec une réduction de la dilatation et un effet positif sur la mortalité dès les plus faibles doses. Les études histologiques et immunohistochimiques nous ont permis d'émettre l'hypothèse que ces effets des radiations proviennent des cellules musculaires lisses et/ou des fibroblastes adventitiels, éléments clés dans la physiopathologie des anévrismes.

L'ensemble des résultats obtenus montrent un effet différentiel des rayonnements ionisants en fonction du contexte physiopathologique au moment de l'irradiation. Afin de mieux comprendre les mécanismes cellulaires qui médient cette réponse une approche *in vitro* passant par de la culture primaire de cellules musculaires lisses et de fibroblastes irradiés provenant d'aortes de souris sera également mise en place.

Mots clés : rayonnement ionisant, anévrisme aortique, faibles doses, microenvironnement.



Mercredi 29 mars

16 h 05 - 17 h 00 Salle 3 Fontaines

ÉPIDÉMIOLOGIE DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Président : Dr Clémence BAUDIN
Chercheuse en épidémiologie
(PSE-SAN / SESANE / LEPID)

Mohamed Yassir ERRAHMANI - Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein

Julie LOPES - Analyse du risque radio-induit de décès chez les professionnels de santé exposés aux rayonnements ionisants

Julie FENDLER - Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire.

SUJET DE LA THÈSE

Étude des arythmies cardiaques et troubles de la conduction après radiothérapie pour un cancer du sein

Doctorant :	Mohamed Yassir ERRAHMANI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Sophie JACOB
Direction de thèse :	Sophie JACOB / IRSN & Jean FERRIERES / INSERM
École doctorale :	Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	Bourse ED

Questionnement scientifique : Dans le cadre de l'Axe programme D3P7 de l'IRSN, un des objectifs vise à mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements-ionisants à des fins diagnostique et thérapeutiques. D'autres complications tardives que les complications-coronariennes et l'insuffisance-cardiaque sont observées après RT, au niveau péricardique, valvulaire ou rythmique. Cependant, très peu d'études se sont spécifiquement intéressées aux arythmies-cardiaques post RT, justifiant de poursuivre les investigations dans ce domaine.

Programme de la thèse :

1ère partie : A partir de données médico-administratives de l'Echantillon Généraliste de Bénéficiaire – EGB du SNDS, évaluer si l'incidence d'arythmie cardiaque caractérisée par l'implantation d'un pacemaker (PM) chez les patientes traitées par RT pour un cancer du sein est plus élevée que dans la population générale.

2ème partie : A partir d'une étude cas-témoins de 116 patientes traitées par RT pour un cancer du sein (21 cas d'arythmie, 95 contrôles sans arythmie), étudier la relation dose-réponse entre le risque d'arythmies cardiaques et les doses absorbées par le cœur, les ventricules et les oreillettes.

3ème partie : A partir des 116 patientes de l'étude cas-témoins, décrire les doses absorbées par les foyers arythmogènes (nœud-sinoatrial et atrioventriculaire) et étudier leur corrélation avec les doses au cœur et sous-structures cardiaques afin d'évaluer l'intérêt de la dosimétrie de ces nœuds dans l'étude de la relation dose-réponse avec les arythmies.

Résultats :

1ère partie : *(Errahmani et al., IJC Heart and Vasculature 2022)*. Une incidence d'implantation de PM deux fois plus élevée chez les patientes traitées par RT par rapport à la population générale. Une tendance à un risque d'implantation de PM deux fois plus élevé chez les patientes traitées par RT pour un cancer du sein par rapport aux non-traitées par RT.

2ème partie : *(Errahmani et al., Frontiers in Oncology 2022)*. Le risque d'arythmie est susceptible d'être plus élevé chez les patientes avec un CS coté droit. L'oreillette droite était la seule structure présentant une dose plus élevée pour les patientes traitées par RT pour un cancer du sein côté-droit par rapport au côté-gauche.

3ème partie : *(Errahmani et al., Clinical and Translational Radiation Oncolog 2022)*. Le Nœud-Sinoatrial et Oreillette-Droite étaient les sous-structures cardiaques les plus exposées pour le CS du côté droit. La dose à Oreillette-Droite était un bon indicateur de dose associée au Nœud-Sinoatrial pour les deux latéralités du cancer du sein et un indicateur de dose associée au nœud-atrioventriculaire pour la latéralité gauche uniquement.

Mots clés : cancer du sein, radiothérapie, simulateur cardiaque, arythmie cardiaque, trouble de conduction, dosimétrie cardiaque.

SUJET DE LA THÈSE

Analyse du risque radio-induit de décès chez les professionnels de santé exposés aux rayonnements ionisants

Doctorante :	Julie LOPES
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Clémence BAUDIN
Direction de thèse :	Marie-Odile BERNIER / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	IRSN

Les études portant sur les travailleurs exposés aux rayonnement ionisants (RI) permettent de caractériser les effets sanitaires résultant d'exposition chroniques aux faibles doses. Bien que de nombreuses recherches aient été réalisées sur le sujet, des incertitudes persistent encore aujourd'hui quant à la quantification de ces effets. À ce jour, le corps médical représente le plus grand groupe de travailleurs exposés professionnellement à des sources artificielles de RI. Leur risque subséquent de diverses pathologies est important à étudier. Néanmoins, les conclusions sont incertaines et font encore l'objet de débats, notamment en ce qui concerne le risque d'apparition de tumeurs du système nerveux central (SNC).

Basés sur des revues de la littérature et sur des analyses statistiques menées à partir des données recueillies dans le cadre du suivi épidémiologique de la cohorte ORICAMs (Occupational Radiation Induced Cancer in Medical staff), ces travaux de thèse visent à améliorer les connaissances sur les effets sanitaires des RI dans le cadre d'exposition à de faibles doses. Ces recherches contribuent ainsi à la mission d'expertise de l'IRSN en matière de radioprotection de l'Homme, et plus particulièrement à caractériser les effets d'une exposition à de faibles doses.

Cette thèse se décline en trois axes : 1) deux revues de la littérature avec méta-analyses sur les risques de développer des tumeurs du SNC (première revue) ou des maladies non-cancéreuses du SNC (deuxième revue) suite à une exposition à de faibles doses de RI au cours de l'âge adulte ont été réalisées et publiées. Des relations dose-risque significatives de maladies cérébrovasculaires et de maladie de Parkinson ont été montrées. 2) Une analyse de la mortalité des professionnels de santé de la cohorte ORICAMs en comparaison avec celle de la population générale a été réalisée. Ce travail a fait l'objet d'un article qui est en cours de révision, et a conclu à une mortalité significativement plus faible chez les travailleurs de la cohorte ORICAMs par rapport à la population générale, ceci pouvant refléter l'effet du travailleur sain. 3) Une estimation du risque de décès par tumeur du SNC avec quantification de la relation dose-réponse et évaluation de l'existence de facteurs confondants éventuels (en cours), à partir d'une étude cas-témoins nichée dans la cohorte ORICAMs.

À ce jour, les premiers résultats de cette thèse permettent de suspecter une augmentation du risque de pathologies non-cancer du SNC après exposition à de faibles doses de RI à l'âge adulte, mais doivent être confirmés.

Mots clés : rayonnements ionisants, épidémiologie, professionnels de santé, système nerveux central.

SUJET DE LA THÈSE

Extensions des modèles de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer les effets sanitaires de co-expositions radiologiques à faibles doses. Application aux travailleurs du cycle du combustible nucléaire

Doctorante :	Julie FENDLER
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Sophie ANCELET
Direction de thèse :	Chantal GUIHENNEUC / Université Paris V - Faculté de médecine
École doctorale :	Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	PIC EPIDEMIO - ORANO

En épidémiologie, les risques de cancer potentiellement induits par des expositions multiples à faibles doses aux rayonnements ionisants (RIs) sont peu étudiés et donc a fortiori peu connus. L'objectif de cette thèse de biostatistique est d'affiner, à l'aide de modèles probabilistes bayésiens et d'algorithmes de machine learning, la caractérisation des risques de décès par cancer associés à des co-expositions radiologiques sujettes à erreurs de mesure. La thèse s'inscrit ainsi dans la stratégie scientifique de l'IRSN en répondant aux questions suivantes : *« Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ? » et « Comment améliorer les concepts, méthodes et outils destinés à évaluer le risque suite aux expositions des travailleurs ? »*

Les premiers travaux de thèse réalisés ont porté sur la cohorte française des mineurs d'uranium, exposés à plusieurs sources de RIs. De précédentes études ont montré que les données d'expositions de cette cohorte sont entachées d'erreurs de mesure pouvant engendrer un biais dans les estimations de risques. Une première étape a consisté à proposer puis à implémenter en Python l'apprentissage statistique bayésien de différents modèles hiérarchiques permettant de corriger l'estimation du risque de décès par 4 types de cancer, potentiellement associé à une exposition chronique au radon à faibles doses. Des facteurs susceptibles de modifier les relations dose-réponse ont été pris en compte. Les différents modèles ont été comparés grâce à des critères pénalisés de sélection de modèles bayésiens.

Un excès de décès par cancer du poumon a été mis en évidence lors d'analyses précédentes. Après prise en compte des erreurs de mesure, ce résultat est confirmé avec une augmentation du risque de décès par cancer du poumon après une exposition cumulée de 100WLM. Les résultats obtenus indiquent que les modèles avec correction des erreurs de mesure s'ajustent mieux aux données de la cohorte que les modèles sans. En revanche, compte-tenu des données disponibles, aucun excès de risque de décès par cancer du rein, cancer du système nerveux central et par leucémie a été mis en évidence, même après correction des erreurs de mesure. Des analyses par simulation ont été réalisées afin de tester la robustesse de l'approche hiérarchique bayésienne proposée. Le deuxième axe de travail consistera à développer un modèle de mélange par régression bayésienne sur profils d'exposition pour estimer le risque de décès par cancer potentiellement associé aux trois co-expositions radiologiques puis à y inclure les structures probabilistes d'erreurs de mesure préalablement définies.

Mots clés : statistique, erreurs de mesure, épidémiologie environnementale, épidémiologie des rayonnements ionisants.

Mercredi 29 mars

16 h 05 - 17 h 00 Salle Camargue

ÉTUDES DE COMPORTEMENT DU BÉTON

Président : Georges NAHAS
Ingénieur-chercheur, conseiller scientifique du projet ODOBA
(PSN-EXP / SES / LMAPS)

Joe MAALOUF - Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI).

Omar NAJJAR - Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave.

Maryam TRAD - Techniques de modélisation multi-échelle de l'interface acier-béton pour le calcul de structures en béton armé à grande échelle.

SUJET DE LA THÈSE

Perméabilité à l'air du béton armé endommagé par des Réactions de Gonflement Interne (RGI)

Doctorant :	Joe MAALOUF
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	Benjamin RICHARD
Direction de thèse :	Stéphane MULTON / INSA Toulouse
École doctorale :	Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & Université Toulouse 3

Parmi les phénomènes intervenants lors du vieillissement des structures en génie civil, il est noté le développement éventuel des pathologies, notamment les Réactions de Gonflement Interne (RGI). Ce type de pathologies est susceptible de dégrader le béton et conduire à l'apparition des fissurations dans les ouvrages touchés. Les Réactions de Gonflement Interne (RGI) englobent la Réaction Alcali-Granulat (RAG) et la Réaction Sulfatique Interne (RSI). Dans la littérature, les recherches relatives à ces réactions se focalisent essentiellement sur les mécanismes physico-chimiques mis en jeu ainsi que les conséquences en termes de comportement mécanique à l'échelle du matériau et de la structure. Plusieurs recherches ont montré que l'endommagement induit par le développement des RGI ne remet pas nécessairement en cause le fonctionnement des ouvrages endommagés. Toutefois, il s'avère important de mettre en question les modifications des propriétés de transfert par les fissurations causées par la dégradation du béton, notamment dans le cas d'ouvrages de génie civil nucléaire. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la question de la stratégie scientifique de l'IRSN intitulée *« comment mieux caractériser et modéliser les modes de dégradation du confinement des matières radioactives, en particulier la deuxième et la troisième barrière, en cas d'agressions internes et externes ? »* et également dans le cadre du programme scientifique du consortium CONCRETE.

L'objectif principal de cette étude sera de combler le manque de données expérimentales sur ce sujet. Dans ce cadre, des mesures de perméabilité à l'air sur des bétons en gonflement libre, avec fissuration d'orientation aléatoire, et sur des bétons armés, avec orientation privilégiée de la fissuration, devraient être envisagées. Ces mesures devront être effectuées pour des bétons présentant une réaction alcali-granulat et une réaction sulfatique interne afin de représenter des niveaux d'expansion finale et des faciès de fissuration différents. Les mesures de perméabilité devront être réalisées à plusieurs échéances pour juger de l'effet de fissurations plus ou moins connectées, mais également plus ou moins remplies de produits de réaction.

Les premiers résultats obtenus montrent que le développement des RGIs et des fissures induites entraîne une augmentation de la perméabilité à l'air du béton en particulier dans les bétons fortement saturés. L'évolution des paramètres de la loi de Klinkenberg avec les expansions est également évaluée dans ce travail. Les données de cette étude permettent de proposer des lois d'évolution des propriétés de transfert en fonction de l'expansion générée et du degré de saturation du béton.

Mots clés : durabilité, perméabilité, gonflement, RAG, RSI.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave

Doctorant :	Omar NAJJAR
Date du début de la thèse :	07 / 02 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	Thomas HEITZ
Direction de thèse :	Frederic RAGUENEAU / ENS Cachan & Benjamin RICHARD / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences - ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

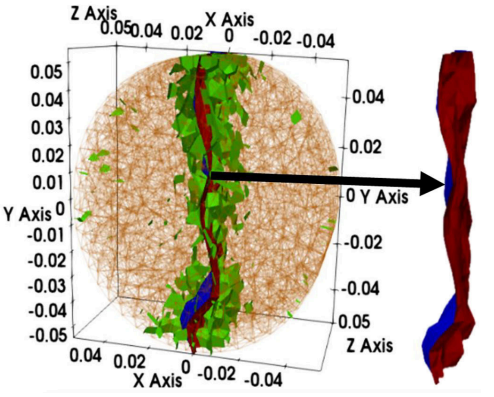
For reactors in the 1300 and 1450 MWe series, the reactor building consists of a double concrete-walled structure. For these reactors, severe accident scenarios (SA) consider an internal pressure of 5 bars (absolute) and a temperature of 150°C, the internal atmosphere then being composed of an air-steam mixture and aerosols (fine particles in suspension). Such conditions induce cracking in the first wall of the containment through which leaks are possible. It is, therefore, necessary to have robust and reliable tools to estimate these leaks.

The objective of the thesis is first to obtain a realistic three-dimensional cracking pattern using a continuous/discrete two-step simulation approach of a reinforced concrete mock-up. Secondly, the results provided by the model are used as input data for fluid mechanics simulations to assess leakage rates in severe containment accident conditions. This is done in parallel with the calibration of the model with the experimental results obtained in the framework of the COBRA program on the MACUMBA facility operated by IRSN. This program consists of cracking two mock-ups of Representative Structural Volumes (RSV) of a containment wall, then applying different pressure, temperature, and hygrometry gradients to either side of them and evaluating the leakage ratios and aerosol retention.

The modeling stages are (1) computation of a continuous damage field with the finite element method (FEM); (2) re-analysis of the highly damaged area with a discrete element method (DEM) to compute physical crack features (Oliver-Leblond et al., 2013); and (3) simulation of the leakage flow rate through the previously computed cracks by a CFD software.

Matalah estimated the average crack opening per element via a post-processing based on fracture energy regularization (Matallah et al., 2010). However, this method does not allow for a complete description of the crack geometry (path, opening, roughness length, etc.). On the other hand, the discrete element method has shown its ability to represent concrete cracking characteristics explicitly (Oliver-Leblond, 2019) and will be used in this thesis.

At the end of the thesis, the development of numerical tools for the estimation of the 3D patterns of complex crack systems in a containment wall's RSV (see Figure 1 for current results using the MATLAB post-processing tool). These cracking patterns, which incorporate various parameters directly from discrete element calculations, will serve as input data for fluid mechanics flow calculations.



Explicit description of the macro-crack

Mots clés : damage, cracking,
discrete element method, flow leakage measurement.

SUJET DE LA THÈSE

Techniques de modélisation multi-échelle de l'interface acier-béton pour le calcul de structures en béton armé à grande échelle

Doctorante : Maryam TRAD

Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2020

Laboratoire IRSN : PSN-EXP / SES / LMAPS

Référent IRSN de la thèse : Ibrahim BITAR

Direction de thèse : Benjamin RICHARD / IRSN & Stéphane GRANGE / INSA Lyon

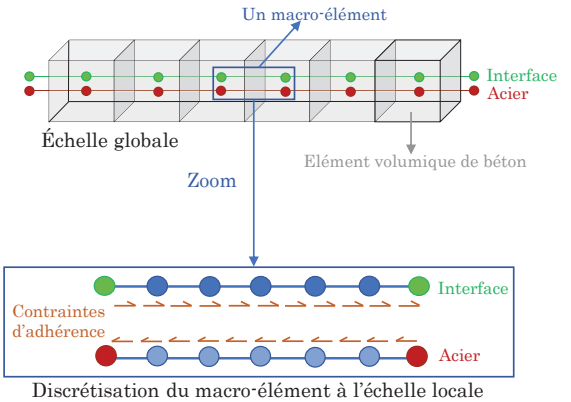
École doctorale : Lyon COMUE - MEGA de Lyon (Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique) - ED 162

Financement de la thèse : IRSN & EDF

Pour les ouvrages de génie civil nucléaire en béton armé tels que enceintes de confinement et les bâtiments auxiliaires, la caractérisation mécanique de leur comportement constitue un défi majeur afin d'évaluer de manière réaliste la formation de fissures. L'une des causes potentielles de ces dégâts est la dégradation de l'interface acier-béton, qui peut affecter significativement la fissuration et la perte d'étanchéité. Cela met en lumière l'importance de disposer d'un modèle numérique capable de prendre en compte ce genre de dégradation à l'interface acier-béton. Les approches existantes de modélisation de cette interface restent peu satisfaisantes car leur mise en œuvre à l'échelle d'un bâtiment industriel demande un temps de calcul élevé (Phan et al. 2015).

Le sujet de ce travail de thèse s'inscrit dans la question de la stratégie scientifique de l'IRSN *« comment mieux caractériser et modéliser les modes de dégradation du confinement des matières radioactives, en particulier la deuxième et la troisième barrière, en cas d'agressions internes et externes ? »*. L'objectif est d'améliorer la manière dont est prise en compte la dissipation d'énergie au niveau de l'interface acier-béton dans les structures à grande échelle. Une approche multi-échelle à degrés de liberté internes est proposée pour la modélisation de l'interface. Cette approche se présente comme un macro-élément capable de reproduire le comportement de l'acier et de l'interface acier-béton reliés au moyen d'une densité de forces d'interface. La formulation de ce macro-élément est intégrée dans des calculs structurels 2D/3D. Des études de cas sont réalisées pour démontrer la robustesse du modèle et sa capacité à reproduire le comportement de fissuration d'un élément structurel en béton armé.

Une méthode de modélisation de l'interface dans le cadre d'éléments de poutres est également proposée. En effet, les éléments de poutres sont bien connus pour leur avantage de fournir des résultats numériques précis pour des temps de calcul raisonnables. Un enrichissement est introduit par rapport à des théories de poutre classiques avec le déplacement de l'acier défini comme un inconnu supplémentaire au niveau des nœuds. Des études de cas sont réalisées pour qualifier l'approche proposée, démontrant sa capacité à reproduire le comportement d'éléments structuraux en béton armé.



Approche multi-échelle de modélisation de l'interface

Mots clés : Interface acier/béton, macroélément, modélisation numérique, béton armé, approche multiéchelle.

Mercredi 29 mars

17 h 05 - 17 h 55 Salle 3 Fontaines

MESURES PHYSIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Président : Dr Amokrane ALLAOUA
Chef de laboratoire (PSE-SAN / SDOS / LMDN)

Ronan LELIÈVRE - Mesure des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes.

Louis ERMENEUX - Dosimétrie des systèmes IRM-Linac utilisés en radiothérapie externe : étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D.

Enya MOBIO - Conception d'un champ neutronique épithermique pour l'étalonnage d'instruments de radioprotection et développement d'une méthode de spectrométrie des neutrons dédiée à leur caractérisation entre 0,5 eV et 10 keV.

SUJET DE LA THÈSE

Mesure des émissions de neutrons produits par lasers extrêmes

Doctorant :	Ronan LELIÈVRE
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Amokrane ALLAOUA
Direction de thèse :	Julien FUCHS / École polytechnique
École doctorale :	Institut polytechnique de Paris - ED 626
Financement de la thèse :	IRSN / École polytechnique

Les lasers ultra-intenses représentent un nouveau moyen de produire des champs neutroniques, plus compact et versatile que les réacteurs nucléaires ou les accélérateurs. Le laser APOLLON, situé sur le plateau de Saclay, serait ainsi capable d'atteindre de très hautes intensités ($10^{8\text{-}9}$ neutrons par impulsion) et des énergies de plusieurs dizaines de MeV, permettant alors de faire de l'imagerie neutronique ou de reproduire en laboratoire le processus rapide de nucléosynthèse responsable de la création des éléments au-delà du bismuth [1].

La nécessité de caractériser ces champs neutroniques s'inscrit dans la volonté de prouver la faisabilité de ces applications mais également dans le but d'assurer la radioprotection et de quantifier les risques associés à ces nouvelles installations en développant des outils diagnostiques adaptés aux caractéristiques des sources de neutrons produites par laser (durée d'émission très courte, flux intense, environnement bruité...).

Les détecteurs passifs, ou possédant une électronique ultra-rapide, semblent donc être des candidats de choix pour faire face à ces problématiques. En complément d'un travail préalable de simulation des termes sources via l'utilisation du code GEANT4, des dosimètres à bulles, un dispositif Temps de Vol ainsi que des échantillons d'activation ont été utilisés sur diverses installations comme TITAN (Livermore, USA) ou APOLLON (Saclay, France).

Ces premières mesures ont notamment permis de mettre en évidence la possibilité de produire des neutrons de plusieurs MeV avec une fluence encourageante pour envisager, à terme, la possibilité d'effectuer de la spectrométrie neutronique par activation.

[1] S. N. Chen, F. Negoita, K. Spohr, E. d'Humières, I. Pomerantz, and J. Fuchs, *"Extreme brightness laser-based neutron pulses as a pathway for investigating nucleosynthesis in the laboratory"*, Matter Radiat. Extremes 4, 054402 (2019), doi : https://doi.org/10.1063/1.5081666.

Mots clés : Neutron, Laser.

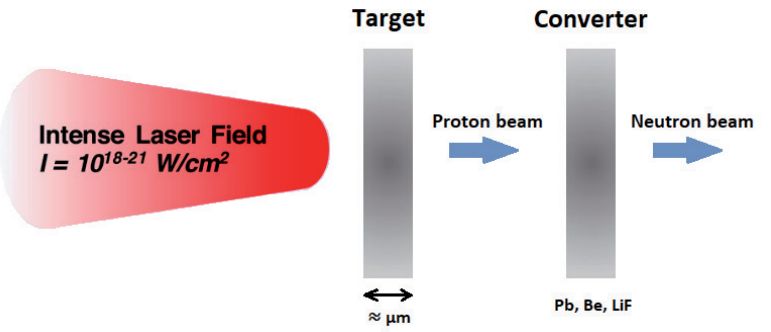


Figure 1
Production de neutrons par laser via la technique dite du « pitcher-catcher ».

SUJET DE LA THÈSE

Dosimétrie des systèmes IRM-Linac utilisés en radiothérapie externe : étalonnage des faisceaux et évaluation des distributions de dose 2D et 3D

Doctorant :	Louis ERMENEUX
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LDRI
Référent IRSN de la thèse :	Christelle HUET
Direction de thèse :	Christelle HUET / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

L'IRM-LINAC est un appareil de radiothérapie guidée par l'imagerie combinant un accélérateur linéaire (LINAC) et un imageur par résonance magnétique (IRM), permettant un meilleur suivi de la tumeur. Des problématiques dosimétriques dues au champ magnétique de l'IRM ont été soulevées dans la littérature. L'objectif de la thèse est de développer des outils dosimétriques et des protocoles robustes utilisables sur les IRM-LINAC afin d'améliorer la connaissance des doses délivrées aux patients traités avec ces appareils (question prioritaire N°5 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN). Le travail est réalisé en collaboration avec le centre de lutte contre le cancer Georges-François Leclerc (Dijon) qui dispose d'un IRM-LINAC d'intensité de champ magnétique égale à 0,35 T.

La première partie du travail se concentre sur le développement d'un protocole de mesure de facteurs d'ouverture du collimateur (FOC) en petits champs, basé sur l'utilisation de films radiochromiques. Aucune variation significative de réponse n'a été observée pour des films EBT3 exposés à différentes durées en présence du champ magnétique. Plusieurs séries de mesures de FOC ont été réalisées sur l'IRM-LINAC avec ces films et des détecteurs actifs (chambres d'ionisation, diodes, microdiamant). Un bon accord est observé entre les FOC mesurés et ceux calculés par le TPS pour les tailles de champ supérieures ou égales à 2,5x2,5 cm², une sous-estimation du FOC TPS est observée pour les tailles de champ inférieures (champ 0,83x0,83 cm² : 6 % pour les films, et 2 % en moyenne pour les détecteurs actifs). Après applications des facteurs correctifs du TRS483, les mesures par détecteurs actifs convergent vers celles obtenues avec les films. Ces écarts avec le TPS tendent à suggérer la nécessité d'un ajustement plus robuste de l'algorithme du TPS pour les petits champs. Des simulations Monte Carlo réalisées sur le code GEANT4 viendront appuyer ces résultats. La seconde partie porte sur le développement d'un protocole d'évaluation des distributions de doses à l'aide de gels dosimétriques, fabriqués au laboratoire, lus par IRM. Leur réponse, caractérisée par lecture IRM (mesure du temps de relaxation T2), a montré une linéarité de la réponse en dose jusqu'à 5 Gy ainsi qu'une sensibilité faible comparativement à la littérature. Des investigations sont en cours concernant une évolution du T2 non uniforme entre la surface du gel et le gel situé plus en profondeur pour des gels non-irradiés, possiblement imputable à une inhomogénéité du gel ou du champ magnétique. Un protocole doit être mis en place pour s'en affranchir.

Mots clés : IRM Linac, radiothérapie guidée par imagerie, dosimétrie, champ magnétique, facteurs d'ouverture du collimateur, films radiochromiques, gels dosimétriques, détecteurs actifs.

SUJET DE LA THÈSE

Conception d'un champ neutronique épithermique pour l'étalonnage d'instruments de radioprotection et développement d'une méthode de spectrométrie des neutrons dédiée à leur caractérisation entre 0,5 eV et 10 keV

Doctorante :	Enya MOBIO
Date du début de la thèse :	11 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Richard BABUT
Direction de thèse :	Daniel SANTOS / LPSC Grenoble
École doctorale :	Grenoble-Alpes - École doctorale de physique - ED 47
Financement de la thèse :	IRSN & LNE

Le sujet de cette thèse répond à la question 3 de la stratégie scientifique de l'IRSN qui porte en partie sur l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions des travailleurs, de la population, des patients et des écosystèmes.

Le LMDN est l'unique laboratoire français chargé de la métrologie des neutrons. Dans le cadre de ses missions, le LMDN dispose d'une plateforme expérimentale permettant de produire des champs neutroniques de référence. Sur les installations CEZANE et AMANDE-MIRCOM, plusieurs dispositifs (voir image) permettant de couvrir les domaines énergétiques dits thermique et rapide.

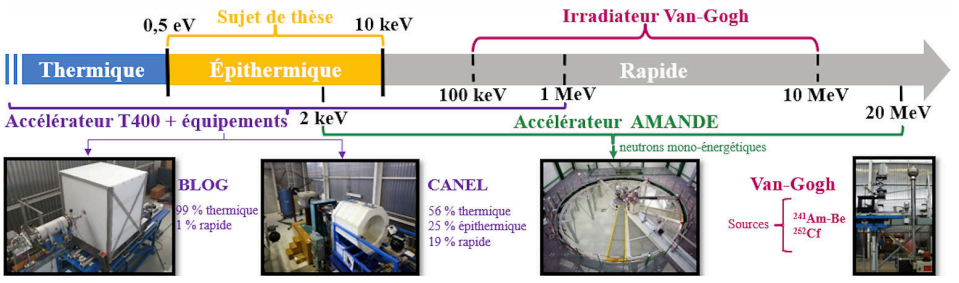
Le domaine épithermique demeurant non représenté dans la métrologie, L'objectif de cette thèse est de concevoir un dispositif permettant la production d'un champ neutronique de référence dans ce domaine en énergie (de 0,5 eV à 10 keV). Ce champ sera un complément majeur pour l'étalonnage d'appareils de radioprotection et de dosimétrie destinés aux travailleurs du nucléaire. De plus les champs épithermiques sont majoritairement utilisés pour des traitements de radiothérapie tel que la BNCT.

Cette thèse s'articule autour de deux grandes parties :

- la conception d'un équipement qui, associé à un accélérateur de particules, permettra de produire un champ neutronique épithermique ;
- La mise en place d'une méthode de caractérisation de ce champ.

Deux dispositifs adaptables à l'accélérateur T400 ont été modélisés. Le premier dispositif, constitué de la superposition de plusieurs matériaux modérateurs, a été obtenus par simulation MCNP. Le second a été réalisé en collaboration avec le LPSC à l'aide d'un algorithme d'optimisation topologique. Ces deux dispositifs répondent à l'ensemble des contraintes mécaniques, techniques et dosimétrique. Cependant, une étude de faisabilité a montré qu'ils n'étaient pas réalisables industriellement à cause de leurs coûts. Des études restent à mener afin d'identifier des matériaux pouvant respecter l'ensemble des contraintes et le budget fixé. Ces contraintes rendent l'obtention de ce champ épithermique incertain dans le cadre de cette thèse. C'est pourquoi, en parallèle, des simulations sont en cours afin de concevoir un nouveau dispositif avec des contraintes allégées. L'objectif est de le construire en 2023 pour mettre au point une méthode de caractérisation de ce champ. Cette méthode restera à appliquer sur le champ épithermique final une fois celui-ci obtenu.

Mots clés : neutron, épithermique, métrologie, dosimétrie, champ.



Installations du LMDN dédiées à la production de champs neutroniques.

Mercredi 29 mars

17 h 05 - 18 h 05 Salle Camargue

THERMOHYDRAULIQUE ET INTERACTIONS FLUIDE-STRUCTURE

Président : Olivier MARCHAND
Adjoint au Directeur de la Recherche en Sûreté
(PSN-RES)

Joauma MARICHAL - Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts avec ébullition et évaporation.

Victoria HAMTIAUX - Simulations numériques directes de la convection naturelle dans un bassin contenant un milieu poreux chauffé.

Giuseppe SPINA - Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire.

Florian REIN - Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave.

SUJET DE LA THÈSE

Convection thermique turbulente dans des conteneurs ouverts avec ébullition et évaporation

Doctorante :	Joauma MARICHAL
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Pierre RUYER
Direction de thèse :	Pierre RUYER / IRSN
École doctorale :	Université Catholique de Louvain
Financement de la thèse :	Université catholique de Louvain

Le projet a pour objectif de faire progresser l'état de l'art dans la modélisation et simulation des transferts de masse et de chaleur au sein d'un bassin, en configuration de convection naturelle et en présence de changement de phase. Ce problème est notamment en jeu lors de l'étude des situations accidentelles de perte de refroidissement des piscines de stockage du combustible. Dans cette situation, la chaleur du combustible usé échauffe et évapore progressivement l'eau du bassin. L'analyse des démonstrations de sûreté correspondantes ont révélé l'intérêt de la modélisation des phénomènes d'évaporation et d'ébullition au sein du bassin. Les limitations des connaissances scientifiques sur ces phénomènes dans de grands bassins ont motivé un programme de recherche à l'IRSN alliant des travaux expérimentaux et de modélisation. Les travaux de ce projet, réalisés hors du cadre de la programmatique de l'Institut, apportent des éléments complémentaires basés sur le développement d'un outil logiciel permettant de décrire finement les phénomènes au sein du bassin.

Le projet est divisé en 4 étapes. La première s'intéresse à la convection naturelle turbulente avec une surface libre au sommet de la géométrie. Ensuite, les étapes 2 et 3 consistent au développement et à la réalisation de simulations numériques permettant de tenir compte de l'évaporation et de l'ébullition respectivement et indépendamment l'un de l'autre. Finalement, nous effectuerons des simulations de convection avec simultanément de l'évaporation et de l'ébullition. Cela permettra de se rapprocher de la réalité des piscines de désactivation nucléaire lors d'accidents de perte de refroidissement.

Dans un premier temps, nous présenterons des simulations numériques de la convection thermique turbulente dans un récipient ouvert avec une surface libre évaporative. Les pertes de chaleur par évaporation et convection à la surface libre sont modélisées à l'aide d'une condition de Neumann thermique dynamique et non-homogène. La descente de la surface libre due à la perte de masse est prise en compte en remaillant dynamiquement le domaine de calcul. Nous analyserons les propriétés et la descende de la surface libre, la structure globale de l'écoulement, l'évolution des nombres de Rayleigh et de Nusselt ainsi que les statistiques turbulentes. Ensuite, nous nous intéresserons aux résultats de simulations de convection de Rayleigh-Bénard avec des bulles de vapeurs. Une approche Eulérienne-Lagragienne où les bulles sont traitées comme des particules ponctuelles est adoptée. La structure générale de l'écoulement, le nombre de Nusselt ainsi que les statistiques turbulentes de l'écoulement seront analysées pour différentes propriétés des bulles.

Mots clés : CFD, évaporation, ébulition.

SUJET DE LA THÈSE

Simulations numériques directes de la convection naturelle dans un bassin contenant un milieu poreux chauffé

Doctorante :	Victoria HAMTIAUX
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2019
Laboratoire IRSN :	PSN-RES/SEMIA/LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Pierre RUYER
Direction de thèse :	Pierre RUYER / IRSN
École doctorale :	Université Catholique de Louvain
Financement de la thèse :	FNRS (Belgique)

Ma thèse se concentre sur des simulations numériques directes de la convection naturelle turbulente dans un bassin contenant un milieu poreux chauffé et entouré d'une région de fluide pur. Ces configurations d'écoulements sont rencontrées lors d'accidents de perte de refroidissement dans les piscines d'entreposage de combustible usé. Les râteliers métalliques contenant les assemblages de crayons de combustible sont modélisés par un milieu poreux.

Ce travail de thèse est financé par une bourse FRIA (FNRS) et réalisé à l'Université Catholique de Louvain avec un co-encadrement IRSN.

L'IRSN développe un programme de recherche sur l'étude de la thermohydraulique de ces piscines, notamment dans le cadre du projet DENOPI et par le développement d'outils numériques pour lesquels la dynamique des écoulements est partiellement résolue et partiellement modélisée. Mes travaux, basés sur la résolution numérique directe, permettent de s'affranchir de cette étape de modélisation mais limitent la réalisation des calculs à des configurations plus idéalisées. La thèse s'est déroulée en trois temps :

- Le développement d'un outil numérique. Son modèle repose sur une approche monodomaine, qui introduit la porosité comme une variable de champ et permet la formulation d'un unique système d'équations de transport valables sur l'ensemble du domaine.
- La validation de cet outil avec des cas expérimentaux et numériques.
- L'obtention et l'analyse de résultats obtenus avec cet outil pour des cas de convection turbulente dans un bassin contenant un milieu poreux immergé chauffé.

Dans une piscine d'entreposage, il existe un passage fluide sous les râteliers déposés en fond de bassin. Dans mes calculs, ceci se modélise en éloignant le milieu poreux de la paroi du fond. Cela conduit à une configuration assez spécifique de convection naturelle dans l'ensemble du domaine.

Nous examinons la dynamique de l'écoulement et les flux de chaleur à travers la matrice poreuse, ainsi que les structures de l'écoulement qui se développent au-dessus de la région poreuse.

Finalement, nous comparons ces résultats avec le cas d'une configuration plus académique de convection naturelle dans un domaine semi-poreux. Dans ce cas, la circulation sous le milieu poreux est empêchée en supprimant l'espace entre la base du milieu poreux et le fond.

Nous proposons par ailleurs une analyse des limites et des potentiels de l'approche développée pour apporter des connaissances pertinentes à l'étude de la situation accidentelle de perte de refroidissement des piscines d'entreposage et présentons les perspectives associées.

Mots clés : CFD, DNS, convection, milieu poreux, piscine d'entreposage.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire

Doctorante :	Giuseppe SPINA
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEMIA / LSMA
Référent IRSN de la thèse :	Danièle VIVALDI & Guillaume BRILLANT
Direction de thèse :	Catherine COLIN / Institut de Mécanique des fluides de Toulouse
École doctorale :	Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie Civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Le sujet de thèse, qui s'inscrit dans le domaine de la sûreté nucléaire, concerne l'étude de l'intégrité du générateur de vapeur (GV) qui est un composant essentiel des circuits primaire et secondaire d'un réacteur à eau pressurisée. L'eau du circuit primaire s'écoule dans un faisceau tubulaire soumis à des phénomènes vibratoires engendrés par l'écoulement eau-vapeur du circuit secondaire. Des phénomènes vibratoires excessifs peuvent causer la rupture d'un ou plusieurs tubes. La thèse vise à étudier les phénomènes vibratoires des tubes et le lien avec l'écoulement diphasique impactant ces tubes et est donc integrée dans la question de la Stratégie Scientifique de l'IRSN intitulée *« Comment s'assurer du maintien de la sûreté-sécurité des installations nucléaires compte tenu des évolutions envisageables de leur domaine et mode de fonctionnement »*.

L'objectif de la thèse consiste à recueillir des données expérimentales pour la caractérisation des écoulements diphasiques au sein d'un faisceau tubulaire transverse ainsi que pour déterminer le lien entre les caractéristiques de l'écoulement et la réponse vibratoire des tubes. De plus, ces données expérimentales serviront à la validation des codes CFD pour les écoulements multiphasiques : des simulations numériques à l'aide du code Neptune_CFD sont réalisées dans le cadre de la thèse. La thèse peut donc être divisée en trois étapes fondamentales :

- la conception et la construction du dispositif expérimental TREFLE (*Two-phase flow REgimes and Fluid-structure interaction Experimental facility*) ;
- L'acquisition des mesures expérimentales et leur analyse ;
- Simulations numériques et comparaisons avec les résultats expérimentaux.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus à l'aide de plusieurs systèmes de mesure dédiés à la caractérisation des écoulements diphasiques. En effet, la caractérisation des régimes d'écoulements et des mesures de taille de bulles ont été obtenus par analyse d'images enregistrées avec une caméra rapide. De plus, le taux de vide local, les tailles et vitesses des bulles ont été mesurés à l'aide d'une bi-sonde optique. Les résultats des simulations numériques sont comparés aux mesures expérimentales pour l'ensemble des essais réalisés. En outre, la vibration du tube central du faisceau a été caractérisée expérimentalement pour les régimes d'écoulement analysés préalablement, permettant ainsi d'estimer l'impact des régimes d'écoulements diphasiques sur les caractéristiques de vibration d'un tube.

Mots clés : écoulements diphasiques, Interaction fluide-structure, CFD.

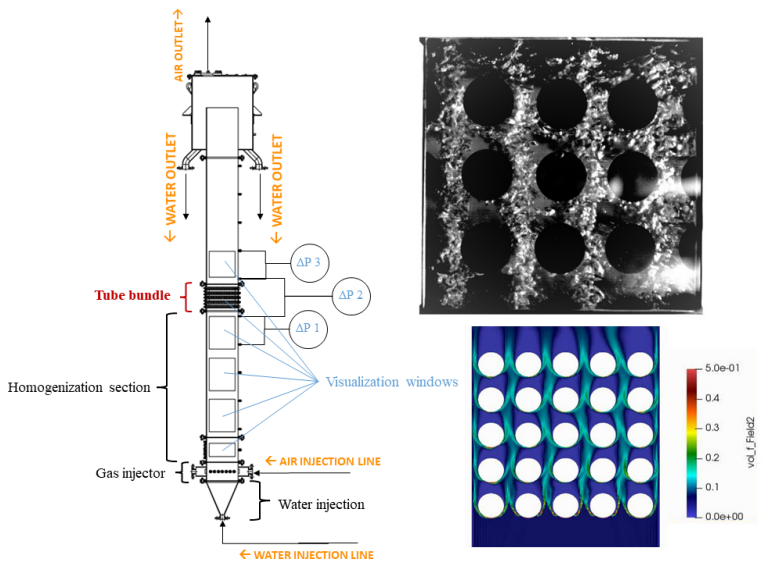


Figure "trefle_res": Schéma de TREFLE avec visualisation de l'écoulement à bulles dans le faisceau tubulaire et résultats numériques en termes de taux de vide.

SUJET DE LA THÈSE

Étude des mouvements convectifs dans une couche mince chauffée par le dessous et refroidie sur le bord – Application aux situations de rétention des matériaux fondus dans la cuve d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave

Doctorant :	Florian REIN
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SAM / LEPC
Référent IRSN de la thèse :	Laure CARENINI
Direction de thèse :	Michael LE BARS / Université Aix-Marseille
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN, EDF & CEA

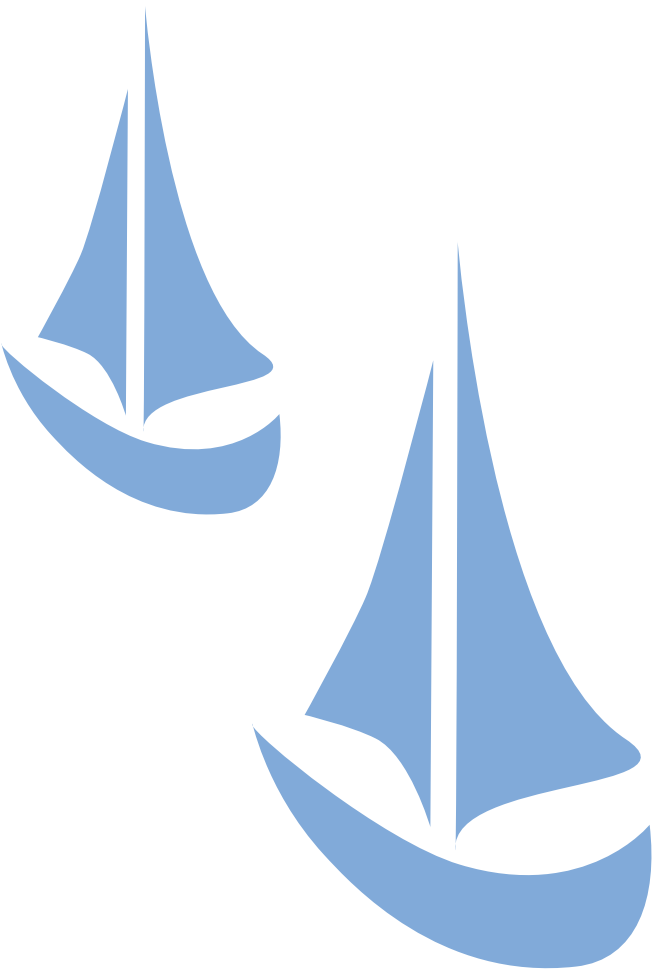
L'IRSN a coordonné de 2015 à 2019 le projet IVMR (In-Vessel Melt Retention) portant sur l'étude de la stratégie de rétention du corium en cuve en cas d'accident grave de réacteur nucléaire et financé par la commission européenne. À la suite de ce projet, une nouvelle méthodologie d'évaluation de cette stratégie s'appuyant sur l'utilisation de codes permettant de décrire l'évolution transitoire de l'accident a été proposée. Les principales incertitudes dans les évaluations actuelles ont également été identifiées. Elles portent notamment sur le flux thermique maximal obtenu en paroi externe de la cuve au niveau de la couche métallique supérieure, qui dépend de l'évaluation des transferts thermiques dans une fine couche de métal, ainsi que de la cinétique de croissance de cette couche de métal au-dessus du bain de corium. L'objectif de ma thèse est d'étudier les mouvements convectifs dans cette couche de métal chauffée par le bas et refroidie sur les bords ainsi que dans une moindre mesure sur la surface supérieure. Celle-ci repose sur les deux aspects suivants menés séquentiellement : simulations numériques 3D DNS (Direct Numerical Simulation, toutes les échelles de la turbulence sont résolues), avec le code NEK500, et la mise en place et utilisation d'un banc expérimental. Ce dernier permettra d'obtenir des résultats en similitude sur des mouvements de gaz par vélocimétrie par image de particules (PIV).

L'objectif est d'établir des lois d'échelle des propriétés moyennes (flux sur le côté, température moyenne en volume et sur le dessus), mais aussi diverses statistiques (fluctuations, déviations standard, max/min, ...) afin de caractériser l'écoulement et d'en déduire une modélisation utilisable à l'échelle réacteur.

Au cours de cette première année, je me suis attelé, avec l'aide du service ingénierie de l'IRPHE et de mes encadrants de thèse, à la conception totale du dispositif expérimental. En parallèle, une étude numérique systématique a permis de mettre en évidence des lois d'échelles sur la température moyenne et la différence de température entre la surface supérieure et inférieure du système en fonction des différents paramètres du problème. Une explication théorique basée sur une approche dimensionnelle a été proposée dont les hypothèses sous-jacentes ont été vérifiées numériquement. L'émergence d'une instabilité faisant apparaître des branches thermiques en rotation a également pu être mise en lumière et commencée à être analysée.

Mots clés : sûreté, mécanique des fluides, convection, *focusing effect*, corrélation, transfert thermique.

Présentation orale annulée



Jeudi 30 mars

08 h 30 - 10 h 10 Salle 3 Fontaines

RADIOBIOLOGIE

Présidente : Dr Agnès FRANCOIS
Experte des expositions aux fortes doses
(PSE-SAN / SERAMED / LRMed)

Ahmad SLEIMAN - Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode *C.elegans* : rôle de la mitochondrie et des dommages à l'ADN nucléaire.

Martin JESTIN - Modification du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser le processus de régénération épithéliale.

Yann THIBAUT - Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire.

Marie FREREJACQUES - Étude Adverse Outcome Pathway (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide à l'aide d'un modèle organoïde rénal.

Polina ARSENTEVA - Modélisation multi-échelle de l'efficacité biologique relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants.

SUJET DE LA THÈSE

Les effets neurotoxiques induits par les protons chez le nématode *C.elegans* : rôle de la mitochondrie et des dommages à l'ADN nucléaire

Doctorant : Ahmad SLEIMAN

Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2020

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SDOS / LMDN

Référent IRSN de la thèse : Christelle ADAM-GUILLERMIN

Direction de thèse : Simon GALAS / Université de Montpellier 2 & Christelle ADAM-GUILLERMIN / IRSN

École doctorale : AMU - Sciences de la vie et de la santé - ED 62

Financement de la thèse : IRSN

Environ 200 000 personnes atteintes de cancer sont traitées chaque année par radiothérapie. Ce projet de thèse répond à la question fondamentale n°5 dans la stratégie de l'IRSN en radioprotection visant à mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques afin de pouvoir quantifier leur risque de survenue et proposer de nouvelles thérapies. Au cours des dernières décennies, les avancées techniques et le progrès de l'imagerie ont permis une irradiation plus précise de la tumeur, entraînant une réduction du volume de tissu normal irradié, notamment grâce à l'hadronthérapie. Cependant, le risque de survenue de séquelles de la maladie ou du traitement pour les patients atteints, n'est pas encore totalement éliminé. Dans le cas des tumeurs cérébrales, malgré l'amélioration de la précision de la délivrance des rayonnements avec l'hadronthérapie, des études ont montré la modification de la fonction et la structure des neurones après irradiation avec protons chez les patients traités. Les voies moléculaires impliquées dans la génération de ces effets neurotoxiques ne sont pas complètement comprises. Sur la base de ces données, nous analysons l'impact de l'exposition aux protons sur le système nerveux en examinant les effets sur la fonction mitochondriale et l'ADN nucléaire, cibles des rayonnements ionisants potentiellement impliquées dans la survenue de maladies neurodégénératives. Pour atteindre cet objectif, le nématode *C. elegans* a été micro-irradié avec 220 Gy de protons (4 MeV) au niveau de la tête, où se trouvent la plupart des neurones, grâce au microfaisceau de protons MIRCOM. Les protons induisent un dysfonctionnement mitochondrial caractérisé par une perte immédiate du potentiel membranaire mitochondrial, un stress oxydant après 24h caractérisé par surproduction de H_2O_2 et une induction de la réponse antioxidative. Une induction de l'autophagie, mécanisme cellulaire qui consiste en la dégradation des compartiments cellulaires endommagés, a été constatée après 5 h d'irradiation. Cependant aucun un effet significatif n'a été observé au niveau de la respiration cellulaire en mesurant le taux de consommation d'oxygène après 24 et 48h. Également, une augmentation significative de nombre de copie d'ADNmt a été observée 24h après l'irradiation. En parallèle de la recherche expérimentale, un AOP, construction conceptuelle représentant les connaissances disponibles sur le lien entre un évènement déclencheur au niveau moléculaire et un effet néfaste sur l'organisme, a été développé en collaboration avec l'institut Santé Canada pour décrire l'impact des rayonnements ionisants sur la mémoire et l'apprentissage et déposé sur AOP Wiki.

Mots clés : mitochondrie, *c.elegans*, protons, microfaisceau, mircom, neurones.

SUJET DE LA THÈSE

Modification du microenvironnement après irradiation localisée du colon : identification de voies moléculaires pour optimiser le processus de régénération épithéliale

Doctorant :	Martin JESTIN
Date du début de la thèse :	30 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Noëlle MATHIEU
Direction de thèse :	Fabien MILLIAT / IRSN
École doctorale :	Sorbonne Université - Physiologie, physiopathologie, thérapeutique - ED 394
Financement de la thèse :	IRSN

Les cancers pelviens ont une prévalence élevée et sont principalement traités par radiothérapie. Bien qu'elle permette un contrôle tumoral, cette thérapie peut également endommager les tissus sains environnants, comme le côlon, et conduire à des complications tardives invalidantes. La diversité et la complexité de ces séquelles ont amené à la définition de la *Pelvic Radiation Disease* (PRD). Le développement de thérapies innovantes pour améliorer la prise en charge des patients touchés par cette pathologie fait partie intégrante de la stratégie scientifique de l'IRSN. Ce projet vise à étudier les modifications du microenvironnement colique (µE) après irradiation et à identifier de nouvelles cibles thérapeutiques pour améliorer la gestion de la PRD dans le côlon.

Pour ce faire, un modèle murin de PRD obtenu après irradiation colorectale unique de 26Gy a été développé. Deux temps d'étude post-irradiation ont été définis : à 2 semaines (S2) pour étudier le processus régénératif précoce, à 12 semaines (S12) pour explorer la fibrose tardive. Des analyses immunohistochimiques ont été réalisées pour caractériser l'épithélium colique après irradiation (prolifération, différenciation et jonctions cellulaires). Nous avons ensuite étudié *in vitro* l'impact du µE colique sur la prolifération épithéliale avec des cocultures associant des colonoïdes et des cellules stromales triées provenant de souris irradiées ou non irradiées à S2 et S12. Le développement des colonoïdes a été évalué selon différents critères (taille, nombre et type). Enfin, le remodelage du µE colique a été étudié au niveau moléculaire sur les cellules stromales triées par une analyse transcriptomique sur cellule unique aux deux temps d'étude.

Les immunomarquages ont permis d'observer une altération des jonctions épithéliales après irradiation. La prolifération et la différenciation épithéliale sont augmentées à S2 post-irradiation au bord de la lésion. Cette augmentation persiste et augmente encore à S12, conduisant à des structures épithéliales anarchiques. Les expériences de coculture montrent une croissance plus importante des colonoïdes cultivés avec des cellules stromales. Parmi les conditions de coculture, les cellules stromales de souris irradiées S12 permettent la plus grande croissance des colonoïdes (taille et nombre). L'analyse transcriptomique unicellulaire a permis d'identifier les différentes populations constituant le µE colique selon la littérature. Nous avons également mis en évidence une population fibroblastique non définie à ce jour. De plus, ces analyses ont permis d'identifier des modifications de voies moléculaires qui pourraient être impliquées dans les altérations épithéliales et expliquer les résultats de coculture. Ces voies pourraient être modulées pour réduire les lésions coliques après irradiation.

Mots clés : radiothérapie, séquelles radio-induites, colon, microenvironnement.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation de l'évolution des dommages radio-induits à l'échelle du tapis cellulaire

Doctorant : Yann THIBAUT

Date du début de la thèse : 07 / 09 / 2020

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SDOS / LDRI
Référent IRSN de la thèse : Yann PERROT
Direction de thèse : Sébastien INCERTI / CENBG

École doctorale : Université de Bordeaux - École Doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur - ED 209

Financement de la thèse : IRSN

Cette thèse s'inscrit dans le programme ROSIRIS qui répond aux questions prioritaires 3, 5 et 7 de la stratégie en radioprotection de l'IRSN. L'objet de ce programme est de mieux connaître les mécanismes à l'origine des effets secondaires des radiothérapies pour améliorer les modèles de risque. Pour cela, un outil de modélisation prédictif liant les étapes du dépôt d'énergie aux effets biologiques tardifs doit être développé. Au cours de deux précédentes thèses au LDRI liées à l'axe 1 de ROSIRIS, des modèles de noyaux cellulaires contenant le génome complet ainsi qu'une chaîne de simulation nanodosimétrique basée sur le code Monte Carlo GEANT4-DNA ont été développés pour calculer les dommages précoces radio-induits à l'ADN pour un noyau cellulaire unique. Cette thèse a pour but de changer d'échelle en passant à la caractérisation de cette topologie des dommages à l'échelle d'une population cellulaire complète, à des temps plus tardifs. Cela permettra d'établir le lien avec l'axe 2 de ROSIRIS, portant sur la compréhension de la dynamique des évènements moléculaires impliqués dans la réponse cellulaire. La simulation par méthode Monte-Carlo de l'ensemble du tapis cellulaire est inenvisageable, de nouvelles méthodologies de calculs sont donc nécessaires.

Dans un premier temps, un nouveau modèle géométrique de noyau cellulaire, plus réaliste en termes de répartition de l'hétérochromatine et de l'euchromatine, a été développé afin d'améliorer les résultats issus de la chaine de simulation nanodosimétrique. Ce nouveau modèle a permis de quantifier l'importance d'une distribution réaliste des degrés de compaction de la chromatine dans les modèles. Dans un second temps, l'outil MINAS TIRITH a été développé pour permettre la distribution des dommages à chaque cellule d'une population cellulaire pour une large gamme de qualité de rayonnement. Cet outil, alimenté par des bases de données générées avec la chaine de simulation nanodosimétrique et avec des simulations microdosimétriques avec GEANT4-DNA, a été vérifié grâce à des résultats issus de simulation Monte-Carlo et validé grâce aux expérimentations MODELL menées par le LRAcc, sur AMANDE. A présent, plusieurs modèles de réparation cellulaire issus de la littérature sont adaptés à la sortie de l'outil MINAS TIRITH et comparés à des données expérimentales, produites par le LRMed via des irradiations menées sur le SAARP et ALPHEE. En parallèle, le développement d'un nouveau modèle pour prédire la sénescence à partir de la simulation du dommage initial est en cours d'élaboration en collaboration avec le SERAMED qui produit les données expérimentales pour ajuster le modèle.

Mots clés : GEANT4, DNA, ROSIRIS, Monte-Carlo, modélisation, DSB, ADN.

SUJET DE LA THÈSE

Étude *Adverse Outcome Pathway* (AOP) de la toxicité rénale d'un radionucléide à l'aide d'un modèle organoïde rénal

Doctorante :	Marie FREREJACQUES
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LRSI
Référent IRSN de la thèse :	Yann GUEGUEN
Direction de thèse :	Yann GUEGUEN / IRSN & Thierry HAUET / Université de Poitiers
École doctorale :	Paris-Saclay - Innovation thérapeutique, du fondamental à l'appliqué - ED 569
Financement de la thèse :	IRSN

L'application récente du concept *Adverse Outcome Pathway* (AOP) dans le domaine de la radioprotection a pour objectif d'améliorer l'évaluation des risques radiotoxicologiques pour la santé humaine. Ce projet s'inscrit ainsi dans les objectifs du groupe de recherche GRT4 *« Radiotoxicologie des expositions chroniques ou répétées »*.

Ce projet repose sur l'utilisation d'un modèle expérimental novateur : l'organoïde rénal. Cette technologie consiste à générer, à partir de cellules souches humaines pluripotentes induites, des cellules organisées en trois dimensions mimant la structure et la fonctionnalité rénale. Les objectifs de la thèse sont (1) de caractériser le modèle organoïde et de réaliser son transfert technique à l'IRSN, (2) d'étudier les effets néfastes de l'uranium puis les événements moléculaires, cellulaires et tissulaires afin (3) de compléter les connaissances de la littérature pour construire l'AOP de la néphrotoxicité induite par l'uranium.

En collaboration avec l'équipe INSERM-IRMETIST spécialisée dans la génération d'organoïdes rénaux, le modèle d'organoïde rénal a été développé et amélioré depuis deux ans afin qu'il développe des caractéristiques phénotypiques et fonctionnelles rénales comparables aux modèles de la littérature. Le transfert technique du modèle organoïde à l'IRSN a été mis au point et la caractérisation de sa structure par histologie (HES) et des populations cellulaires par des techniques d'immunomarquages ont mis en évidence des cellules du glomérule, des tubules proximaux et distaux. L'étude du profil transcriptomique du modèle viendra compléter cette caractérisation phénotypique. Tout d'abord, les études d'exposition des organoïdes rénaux à l'uranium ont été effectuées pour étudier les effets cytotoxiques (apoptose et nécrose) de l'uranium en fonction des conditions d'expositions (durées et doses), permettant de définir la sensibilité du modèle. Une étude par Secondary Ion Mass Spectrometry permettant de localiser l'uranium au niveau cellulaire de l'organoïde a été développée en lien avec les études précédemment réalisées au laboratoire. En parallèle, le modèle cellulaire rénal 2D hRPTEC TERT1 de référence a été utilisé afin de comparer les résultats obtenus sur la néphrotoxicité de l'uranium avec l'organoïde rénal (mesures MTT,ATP, GSH; expression des protéines liés à l'apoptose et au stress oxydant) .A partir de l'AOP préliminaire de l'insuffisance rénale récemment publié sur AOPwiki (447), des évènements clés ont été identifiés dans les voies inflammatoire, pro-oxydante, apoptotique et seront investiguées par analyse d'expression des gènes (qPCR) et des protéines (techniques de screening par membrane array, ELISA). L'ensemble des évènements clés identifiés et leurs relations permettront de consolider et d'établir le réseau AOP de la néphrotoxicité induite par l'uranium.

Mots clés : AOP, organoïde, rein, uranium, néphrotoxicité.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation multi-échelle de l'efficacité biologique relative pour la prédiction des risques non-cancer après exposition aux rayonnements ionisants

Doctorante :	Polina ARSENTEVA
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Mohamed Amine BENADJAOUD
Direction de thèse :	Hervé CARDOT / Institut de mathématiques de Bourgogne
École doctorale :	Université Bourgogne - Franche-Comté - École doctorale carnot - pasteur - ED 553
Financement de la thèse :	IRSN & région Bourgogne Franche-Comté

More than 200 000 patients undergo radiotherapy in France every year. Similarly to other treatments, it may induce adverse side effects for healthy tissues situated close to the irradiated tumor. It is thus of substantial importance to study and compare different modes of radiotherapy that vary in dose, volume, energy, etc. with a goal of selecting such that minimize the potential undesirable consequences.

This PhD project aims at developing a multi-scale model combining in-vitro omic radio-induced response with i*n vivo* post-irradiation adverse effects. The focus hitherto lied on the former, in particular on the response of endothelial cells, key actors in the appearance of radiation adverse effects. Specifically, we study the expression of genes originating from datasets corresponding to different irradiation types that were collected for several time points under irradiated and non-irradiated conditions. The goal was to determine a small number of the most representative behavior types among all considered genes, as well as to identify potential biological pathways linked to the response to radiotherapy. The quantity of interest is a radio-induced fold change: a measure of irradiation effect represented by the difference between the two experimental conditions over time.

To achieve the goal, we propose a new approach based on modeling fold changes as random variables, and a new distance that allows to account for uncertainties and correlations between variables. We designed a computationally efficient procedure performing simultaneous clustering and alignment of fold changes' random estimators. This procedure provides insight into regulatory pathways connecting genes with different behavior types with respect to their response. Based on the obtained information, a gene network is inferred, followed by network analysis which allows to draw a comparison between different modes of radiotherapy. The utilized tools have been evaluated through numerous simulations against multiple state-of-the-art alternatives, showing efficacy in the context of the data in question. Moreover, applied to the real data, the method is able to uncover meaningful patterns with respect to fold changes dynamic, cellular processes, and key actors demonstrating differences between the radiation types. Finally, the ongoing work addresses the means to integrate into the model the adverse effects originating from the *in vivo* data along with the associated statistical challenges in order to be able to make predictions.

Mots clés : radiobiology, transcriptomics, clustering, alignment, network inference.

Jeudi 30 mars

08 h 40 - 10 h 10 Salle Languedoc

MODÉLISATION DES ALÉAS NATURELS ET DE LEURS IMPACTS SUR LES STRUCTURES / ÉVALUATION DU RISQUE D'ACCIDENT NUCLÉAIRE

Présidente : Dr Oona SCOTTI
Recherche et expertise en aléa sismique
(PSE-ENV / SCAN / BERSSIN)

Nicolas CATHELIN - Caractérisation du mouvement Quaternaire de la terminaison NE du système de failles des Cévennes.

Loïc GISSELBRECHT - Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs.

Julien CLEMENT - Caractérisation de l'Interaction Sol Structure au travers de la mesure *in situ* de la fonction d'impédance.

Charlie SIRE - Méthodes de quantification pour la visualisation de l'aléa inondation.

Rémi HANNOTEL - Internaliser le risque d'accident nucléaire dans le mix électrique.

SUJET DE LA THÈSE

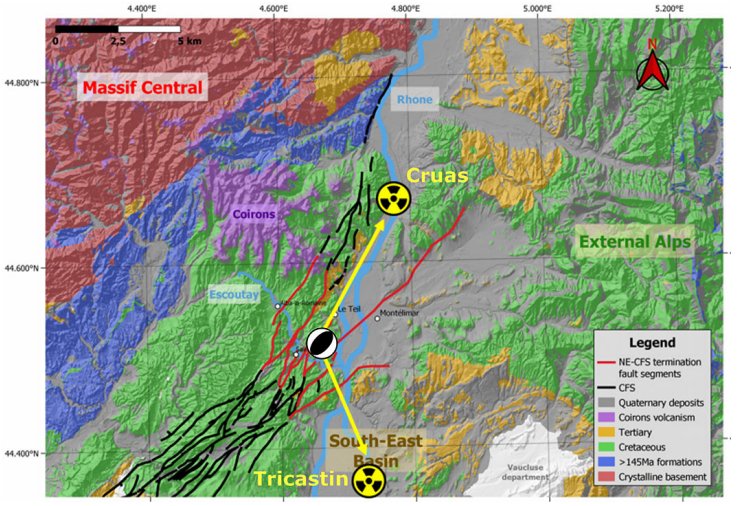
Caractérisation du mouvement Quaternaire de la terminaison NE du système de failles des Cévennes

Doctorant :	Nicolas CATHELIN
Date du début de la thèse :	4 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Référent IRSN de la thèse :	Stéphane BAIZE
Direction de thèse :	Jean-françois RITZ / Géosciences Montpellier
École doctorale :	Montpellier - GAIA : biodiversité, agriculture, alimentation, environnement, terre, eau - ED 584
Financement de la thèse :	IRSN

Le séisme du Teil (11.11.2019) de Mw 4.9 a produit une rupture de surface de 5 km de long avec un déplacement inverse de 1.5 à 13 cm. Cet évènement a réactivé la faille de la Rouvière (LRF), une ancienne faille normale Oligocène (~25 Ma), appartenant à l'un des systèmes de failles les plus importants en France métropolitaine, le système de failles cévenol (CFS). LRF n'était pas connue comme une faille potentiellement active et n'était pas représentée dans la base de données des failles potentiellement actives (BDFA) de l'IRSN. Seules les failles des Cévennes, de Saint-Montan (SMF) et de Marsanne (MF) y étaient répertoriées comme failles potentiellement actives. Cet évènement a soulevé plusieurs questions dont celle de savoir si LRF et les autres segments de failles du CFS ont été actifs durant la période Quaternaire (0-2.5Ma) ?

Pour répondre à ces questions et avec pour objectif d'apporter le cas échéant des informations quantitatives sur l'âge des paléoséismes, leurs mécanismes et leurs magnitudes, des tranchées ont été ouvertes sur LRF ainsi que sur les failles de Marsanne et de Saint-Montan. Plusieurs indices géologiques ont été recherchés pour évaluer l'occurrence de paléoséismes rompant la surface. Ces résultats permettront une réévaluation de l'aléa sismique dans la région, où deux centrales nucléaires sont implantées (Cruas et Tricastin).

Les premières données suggèrent que LRF a effectivement produit au moins une rupture de surface entre 13.5 et 3.3 ka et les études sur MF (thèse de C.Thomasset) et SMF (cette thèse) sont en cours. Ces deux thèses sont réalisées en étroite collaboration notamment du point de vue de l'analyse de terrain. Le travail sur la faille de Saint Montan met en œuvre principalement l'approche paléosismologique (analyse de tranchées), avec l'aide en amont de cartographie de géophysique de sub-surface, et s'appuie également sur une analyse géomorphologique.



Carte représentant la terminaison NE du système de failles des Cévennes ainsi que la distance entre l'épicentre du séisme du Teil (11 Novembre 2019) et les centrales de Cruas et de Tricastin.

Les résultats préliminaires suggèrent qu'il y a bien eu une activité récente sur MF. En ce qui concerne SMF, les résultats sont moins probants et des études complémentaires sont en cours pour distinguer si les structures superficielles observées dans le quaternaire récent correspondent à des paléoruptures de surface ou s'il s'agit de phénomènes gravitaires et/ou cryo-tectoniques.

Mots clés : géologie, paléosismologie, géomorphologie, Quaternaire, failles, séisme.

SUJET DE LA THÈSE

Estimation des effets de site particuliers à partir du bruit sismique ambiant mesuré sur un réseau dense de capteurs

Doctorant :	Loïc GISSELBRECHT
Date du début de la thèse :	10 / 09 /2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Référent IRSN de la thèse :	Bérénice FROMENT
Direction de thèse :	Pierre BOUE / ISTERRE
École doctorale :	Grenoble-Alpes - Terre, Univers, Environnement - ED 105
Financement de la thèse :	ANR DARE

Lors d'un séisme, l'amplitude des secousses sismiques peut être amplifiée, et leur durée allongée au sein de certaines structures géologiques, comme les bassins/vallées sédimentaires. Ce phénomène, appelé « effets de site » est important à prendre en compte dans l'évaluation de l'aléa sismique en un site. Le SCAN/BERSSIN étudie ce phénomène depuis plusieurs années. Dans le cadre du projet ANR franco-allemand DARE (2020-2023), le « bruit sismique ambiant » est enregistré sur un réseau de 400 capteurs sismiques dans la zone du Tricastin pour analyser les effets de site liés à la vallée sédimentaire du Rhône. Le bruit sismique ambiant correspond aux faibles vibrations permanentes de la surface de la Terre. D'origine naturelle ou anthropique, il constitue une source de données sismiques permanente et présente ainsi un intérêt évident pour étudier les effets de site dans les régions de faible sismicité (comme en France métropolitaine). L'objectif de cette thèse est d'étudier le potentiel du bruit ambiant dans l'analyse des effets de site.

Durant les premiers mois de thèse, j'ai procédé à un contrôle des données pour sélectionner les enregistrements de qualité suffisante. J'ai ensuite cherché à estimer à partir du bruit sismique l'amplification du mouvement qui serait observée dans la zone en cas de séisme. Les résultats montrent que l'amplification estimée à basse fréquence (< 1 Hz) est cohérente avec la structure de la vallée sédimentaire. L'estimation de l'amplification à haute fréquence (i.e. > 1 Hz) est plus critique en raison de l'influence de sources anthropiques locales de vibrations liées à l'industrialisation de la zone. Pour retrouver l'amplification liée aux effets de la structure géologique, il faut limiter l'influence de ces sources. J'ai utilisé un algorithme de clustering afin de sélectionner pour chaque capteur, les données les moins impactées. J'ai ainsi pu améliorer l'estimation aux capteurs impactés par des sources transitoires, mais pas dans les zones impactées par des sources sans interruption (Fig. 1). Je cherche actuellement à améliorer ces résultats à travers des « corrélations de bruit sismique ». Cette opération permet d'extraire le bruit sismique cohérent à travers le réseau de capteurs, pouvant aider à filtrer les effets de sources parasites.

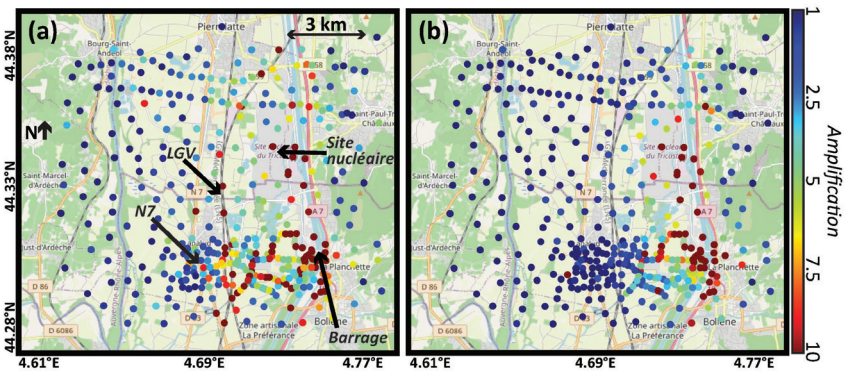


Figure 1. Amplification du mouvement sismique estimée dans la zone du Tricastin avant (a) et après (b) application de notre méthode de clustering. L'impact des sources transitoires de bruit sismique (Ligne Grande Vitesse - LGV, Nationale 7 – N7) a été limité grâce à notre méthode. L'impact des sources sans interruption (barrage hydroélectrique de la CNR, site nucléaire) reste néanmoins important.

Mots clés :
aléa sismique, effets de site, amplification, mouvements du sol, bruit sismique, réseau de capteurs.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation de l'Interaction Sol Structure au travers de la mesure *in situ* de la fonction d'impédance

Doctorant :	Julien CLEMENT
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP / SES / LMAPS
Référent IRSN de la thèse :	Maria LANCIERI
Direction de thèse :	Jean-François SEMBLAT / ENSTA & Benjamin RICHARD / IRSN
École doctorale :	Institut polytechnique de Paris - ED 626
Financement de la thèse :	IRSN

Lors de la vérification d'une structure de génie civil sous chargements sismiques, l'Interaction Sol-Structure dynamique (ISS) est évaluée par des analyses numériques avec peu de possibilités de se référer à des mesures *in situ*. La méthode la plus couramment mise en œuvre, pour modéliser l'ISS, est basée sur la détermination des fonctions d'impédances (FI) caractéristiques de la fondation, du niveau sismique et du domaine géotechnique propre au projet. L'implémentation de cette méthode est particulièrement aisée étant donné qu'elle décrit la relation effort-déplacement à l'interface sol-fondation pour des sollicitations harmoniques mono-fréquentielles. Toutefois, cet outil s'appuie sur plusieurs hypothèses simplificatrices telles qu'une stratigraphie homogène du sol ou la propagation verticale des ondes sismiques. L'objectif de ces travaux de thèse est d'établir un protocole de mesures *in situ* de la FI, un cadre analytique d'exploitation des mesures ainsi que son domaine de validité dans l'optique d'acquérir des données de consolidation des simulations réalisées. Dans un premier temps, l'ISS est évaluée dans un cadre élastique linéaire ; les hypothèses suivantes sont considérées :

- un comportement linéaire du sol, de la fondation et de l'interface (pas de glissement/décollement) ;
- une fondation superficielle relativement rigide par rapport au sol.

La principale difficulté d'un tel exercice est l'acquisition des données de l'effort à l'interface sol-fondation. Afin d'y parvenir, nous proposons de contrôler le système en efforts par l'application de forces d'inerties. Pour un tel dispositif les efforts d'inerties sont alors générés par des pots vibrants appliquant des sollicitation mono-fréquentielles et unidirectionnelles. Dans ces conditions, il suffit de mesurer les déplacements de la fondation avec des appareils conventionnels (tels que des accéléromètres ou des vélocimètres) afin d'obtenir la FI. En effet, sur la base des hypothèses ci-avant, il est possible d'établir l'équation caractéristique du système relative à l'équilibre mécanique de la fondation par l'application de la dynamique des solides indéformables.

Afin de valider cette démarche, un essai échelle réduite sur une maquette reproduisant le dispositif est en cours de mise en œuvre. Le but est d'évaluer la faisabilité de la mesure ainsi que l'applicabilité des équations permettant de calculer la FI. En parallèle, des études de faisabilité et d'applicabilité du protocole proposé à l'échelle 1 sont menées via des simulations numériques aux éléments finis.

Mots clés : génie civil, séisme, simulation, essai.

SUJET DE LA THÈSE

Méthodes de quantification pour la visualisation de l'aléa inondation

Doctorant :	Charlie SIRE
Date du début de la thèse :	21 / 09 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Référent IRSN de la thèse :	Lucie PHEULPIN & Yann RICHET
Direction de thèse :	Rodolphe LE RICHE / École des Mines de St-Etienne
École doctorale :	Lyon COMUE - Sciences, Ingenierie, Santé - ED 488
Financement de la thèse :	IRSN & BRGM

Les exploitants nucléaires doivent suivre les préconisations du guide de l'Autorité de Sûreté Nucléaire n°13 dans le cadre de la démonstration de sûreté des installations nucléaires de base face au risque d'inondation d'origine externe, accru par la rupture d'ouvrages de protection. Le niveau d'eau de référence, qui est le niveau maximal sur l'emprise d'un site, est ainsi classiquement déterminé à l'aide de modèles numériques complexes et exigeants d'un point de vue computationnel, qui prennent notamment en compte des variables associées aux phénomènes naturels aléatoires et des variables liées à la rupture des ouvrages de protection. Les études probabilistes liées à ce niveau d'eau caractérisant l'inondation sont indispensables dans les examens de sûreté, et requièrent un grand nombre de simulations numériques. Leur coût computationnel pose donc d'importantes questions de recherche, et impose le développement de méthodes adaptées.

L'objectif de la thèse est de fournir des méthodes de visualisation permettant une meilleure compréhension de la loi de probabilité de cet aléa. Tout d'abord, une procédure d'affichage de quelques cartes d'inondations prototypes représentant au mieux la loi de probabilité de l'événement inondation a été développée. C'est un problème de quantification typique, mis en place dans le contexte spécifique de la thèse :

- tout d'abord, les simulateurs couteux compliquent le calcul des cartes d'inondations, et un métamodèle doit donc être mis en place ;
- ensuite, l'inondation étant un événement rare, les méthodes de Monte Carlo classiques ne sont pas adaptées pour générer des cartes d'inondation de très grande période de retour (typiquement 10 000 ans), et un échantillonnage adapté est développé (Importance Sampling) ;
- enfin, la quantification est réalisée dans un espace de cartes pixélisées 64x64, impliquant des problématiques de stockage et un métamodèle adapté à des sorties spatiales.

Les cartes prototypes sont associées à une probabilité correspondant au cluster qu'elles induisent.

Une étude de la loi probabiliste des variables d'entrée, i.e les aléas naturels et les brèches, associées à chaque carte prototype est ensuite menée, à travers la visualisation d'un mélange de distributions bien connues approchant la distribution du cluster.

Les développements évoqués ont été testés sur des cas tests analytiques puis sur un cas d'inondation côtière proposée par le BRGM. L'application sur le cas fluvial de la Loire est prévue d'ici la fin de la thèse. Les résultats sont très encourageants, au niveau de la précision de l'échantillonnage et du métamodèle, ce dernier étant particulièrement délicat à construire.

Mots clés : inondation, statistique, probabilité, métamodèle.

SUJET DE LA THÈSE

Internaliser le risque d'accident nucléaire dans le mix électrique

Doctorant :	Rémi HANNOTEL
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESUC / LERN
Référent IRSN de la thèse :	Sophie CETRE
Direction de thèse :	Mirko WIEDERHOLT / Science Po Paris & Xavier RAGOT / CNRS
École doctorale :	Institut études politiques de Paris – École doctorale de Sciences Po - ED 234
Financement de la thèse :	IRSN

Face au risque du dérèglement climatique, la décarbonation de notre économie est devenue un objectif central qui gouverne nos choix énergétiques. Cependant, la façon dont sont pris en compte les divers risques associés au processus de décarbonation du mix énergétique pose question, notamment le risque nucléaire.

L'évaluation du risque d'accident nucléaire est déterminée en calculant l'espérance des coûts de l'accident, c'est-à-dire la probabilité d'accident multiplié par les coûts d'un tel évènement. Outre les limites de cette approche liées aux incertitudes qu'elle véhicule, le décideur public est considéré comme neutre au risque, ce qui en implique une appréciation imparfaite du risque d'accident nucléaire sur le mix électrique, c'est-à-dire l'arrêt significatif d'une partie de la production d'électricité d'origine nucléaire. Du point de vue du décideur qui cherche à maximiser le bien-être social, le risque d'accident nucléaire est une externalité à prendre en compte dans ses choix d'investissement, d'autant plus lorsque l'on prend en compte les conséquences sur le mix électrique et les objectifs de décarbonation. Je m'intéresse donc à la manière dont les investissements dans le secteur du nucléaire évoluent pour le planificateur social lorsqu'il internalise le risque d'accident.

En effet, en cas d'accident, outre le risque d'approvisionnement qui impacterait significativement l'économie et la société, le report du besoin en énergie sur les sources fossiles aurait pour conséquence un mix électrique davantage carboné, comme ce fut le cas au Japon après l'accident de Fukushima. Ainsi, les diverses politiques environnementales visant à internaliser la pollution induite par l'utilisation des énergies fossiles, comme la taxation du CO_2, augmentent le coût associé à l'accident et donc peuvent jouer un rôle sur la façon dont on apprécie le risque nucléaire, influençant par conséquent les investissements en termes de sûreté et de capacité installée.

Je mobilise un « modèle de Ramsey » intégrant un système énergétique à une économie afin d'optimiser les choix d'investissement en prenant en compte le risque d'accident et les capacités installées. Le risque d'accident impacte le module énergétique notamment au travers d'une diminution du facteur du charge de la production nucléaire, une plus grande dépréciation des capacités installées et une élévation des coûts d'opération et de maintenance. Le modèle permet d'analyser la façon dont les investissements devraient évoluer compte tenu du choc, en intégrant la dimension intertemporelle du problème, ce qui rend central la façon dont le planificateur social valorise le futur.

Mots clés : économie, environnement, énergie, sûreté, self protection, risque nucléaire, mix électrique, mix énergétique.

Jeudi 30 mars

08 h 50 - 10 h 10 Salle Camargue

MODÉLISATION DE L'INCENDIE ET DE L'EXPLOSION

Président : Dr Hugues PRETREL
HDR, Ingénieur-Chercheur, Expert IRSN
(PSN-RES / SA2I / LEF)

Safir HADDAD - Étude de la propagation et du contrôle des fumées en galeries souterraines complexes : Application à la maîtrise du risque pour des configurations de stockage de déchets radioactifs.

Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY - Modelling of Turbulence-Combustion Interactions (TCI) for the Simulation of Fires in Confined and Ventilated Enclosures.

Emeline GEORGES - Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé.

Raphaël GAVART - Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type.

SUJET DE LA THÈSE

Étude de la propagation et du contrôle des fumées en galeries souterraines complexes : application à la maîtrise du risque pour des configurations de stockage de déchets radioactifs

Doctorant :	Safir HADDAD
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SA2I / LIE
Référent IRSN de la thèse :	Samuel VAUX
Direction de thèse :	Olivier VAUQUELIN / Aix-Marseille Université
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN

Dans le cadre du projet CIGEO (projet de stockage de déchets radioactifs en couches géologiques profondes), l'étude des incendies en galeries souterraines est un enjeu majeur de sûreté. En effet, il faut veiller à réduire au maximum le risque d'altération du confinement des déchets radioactifs (perte d'intégrité et dégradation des structures abritant les déchets sous l'effet de l'incendie) et à assurer la sécurité des opérateurs dans ces installations. Afin d'appréhender au mieux le risque incendie, il est essentiel de comprendre les différents régimes d'écoulement de la fumée dans les galeries afin de proposer une stratégie de ventilation.

Lors de la phase instationnaire de l'incendie, correspondant aux premiers instants de sa propagation, la cinétique d'un volume défini de fumée obéit à différentes lois successives de propagation (thèse IRSN, Romain Hanouzet, 2016-2019). Dans la continuité de ces travaux et dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons désormais à la phase établie d'un incendie (phase stationnaire), pour laquelle nous considérons une injection continue de fumée.

Afin de modéliser le comportement aéraulique de la fumée d'incendie, nous l'assimilons à un courant de gravité issu d'une injection de fluide léger (mélange air/hélium) se propageant longitudinalement dans son environnement. Dans cette configuration, nous avons, dans un premier temps, construit un modèle théorique et établi les solutions analytiques afférentes. Ce modèle, basé sur les équations de conservation (masse, quantité de mouvement et énergie), nous permet d'estimer les variations des trois quantités d'intérêt (épaisseur, vitesse et masse volumique) du courant. Dans un second temps, nous avons étendu ce modèle au cadre non-Boussinesq (écart important entre la masse volumique du courant et celle de l'air ambiant) afin d'améliorer la représentativité de ce modèle vis-à-vis d'une nappe de fumée réelle. Par la suite, nous avons inclus et étudié dans ce nouveau modèle les contributions respectives de la pente de la galerie ainsi que de l'échange de chaleur entre la nappe et le plafond.

Parallèlement à cette approche, nous avons réalisé des simulations numériques aux grandes échelles (utilisant le logiciel CALIF3S-Isis) afin de confronter les résultats obtenus par le modèle théorique et ceux de la simulation. Les comparaisons modèle/simulations sont satisfaisantes, et montrent la pertinence de cette modélisation simple afin d'obtenir des résultats fiables avec un faible temps de calcul. Dans un dernier temps, nous planifions une partie expérimentale, sur une maquette de tunnel réduit, afin de mieux comprendre les effets couplés d'une ventilation longitudinale et de la pente.

Mots clés : incendie, fumée, ventilation, aéraulique, tunnel.

SUJET DE LA THÈSE

Modelling of Turbulence-Combustion Interactions (TCI) for the Simulation of Fires in Confined and Ventilated Enclosures

Doctorant :	Uday CHIKKABIKKODU KRISHNA MURTHY
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SA2I / LIE
Référent IRSN de la thèse :	Germain BOYER
Direction de thèse :	Arnaud MURA / Université de Poitiers
École doctorale :	Universités de Poitiers & de Limoges - Sciences et ingénierie des matériaux, mécanique, énergétique (SIMME) - ED 609
Financement de la thèse :	IRSN

Reactive large-eddy simulations (LES) are becoming increasingly popular for modeling and analyzing large-scale fire scenarios, including the development of complex fire sources (such as glove box [GB] fires), under confined and ventilated conditions. Yet, the eddy dissipation model (EDM), which remains the most popular turbulent-combustion model used in fire simulations, cannot capture certain phenomena related to the turbulence-combustion interactions taking place inside the GB. For instance, the EDM tends to over-predict the temperature, and it cannot describe some specific phenomena such as local extinction-reignition that may occur as a result of strain effects or radiative losses (with important possible consequences in fires, e.g, flash-over). Moreover, it cannot predict the concentration of intermediate species – *e.g.*, CO and soot precursors – that are particularly monitored in fire simulations. Finally, it cannot handle complex fire sources composed of multiple combustible species, which may result from the pyrolysis of different solid materials.

Therefore, a multiple-inlet (fuel/oxidizer) steady laminar diffusion flamelet model is being developed. The corresponding framework is shown to be a natural extension of the standard steady laminar flamelet model but generalized to multiple oxidizer and fuel inlet streams that are characterized by specific inlet tracers. The laminar flamelet framework assumes small but finite chemical time scales compared to flow time scales. This allows the computation of the flame structures (i.e., a set of one-dimensional flamelets) independently from the flow. In the present case, the computed data are tabulated as a function of strain rate, mixture fraction, and inlet tracers associated with multiple fuel and oxidizer inlet streams. Then, presumed probability density functions (PDF) are used to map laminar flame structures and the resulting turbulent flame structures are stored in lookup tables. These tables are directly used during the CFD computation without solving any other transport equation except those relevant to conserved scalars evolutions (i.e., mixture fraction and inlet tracers). Firstly, the standard steady laminar flamelet model is used to simulate the Sandia Flame D configuration. Subsequently, the multiple-inlet steady laminar diffusion flamelet model is applied to the simulation of the jet in hot co-flow (JHC) configuration of Dally and coworkers, which is a standard benchmark for multiple inlet models. The next targeted reactive flow is the glove box fire, in which the above-mentioned physical issues (i.e., multiple fuels, flame strain effects, soot production, and radiative heat transfer) require special care to obtain a correct description of the flow dynamics and heat transfer.

Mots clés : turbulence, combustion interactions, steady laminar flamelet model, multiple inlets, glove box fires.

SUJET DE LA THÈSE

Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température - Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé

Doctorante :	Emeline GEORGES
Date du début de la thèse :	19 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SA2I / LEF
Référent IRSN de la thèse :	Hugues PRETREL
Direction de thèse :	Olivier VAUQUELIN / AMU
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN

Dans le domaine nucléaire, les installations consistent en des locaux mécaniquement ventilés le plus souvent clos. Lorsqu'un feu se déclare dans ces locaux, il se propage en partie haute dans une zone à haute température qui tend à favoriser l'augmentation de la puissance du feu en accélérant la pyrolyse du combustible. A contrario, la faible teneur en oxygène de cette zone tend à diminuer cette puissance. Les effets couplés de ces deux phénomènes physiques sont encore assez mal compris. L'IRSN ayant pour mission d'évaluer le risque incendie, la problématique des foyers en hauteur est donc un sujet d'intérêt, d'autant plus que l'élévation influe également sur l'écoulement des fumées dans le compartiment. C'est pourquoi, cette thèse étudie les effets de l'augmentation de la température et de la viciation de l'air sur un feu de nappe placé en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé. Deux aspects sont examinés : la combustion et le remplissage du local par les fumées.

Le premier volet de l'étude, majoritairement expérimental, s'est concentré sur l'influence de l'élévation du foyer sur la combustion. Dans un premier temps, le caisson est fortement ventilé afin de s'affranchir de la sous-oxygénation. Dans un second temps, l'atmosphère est viciée. Les résultats montrent un fort effet des flux thermiques rayonnés dans le cas bien ventilé, le débit de perte de masse (MLR) présentant deux régimes liés à l'impact de la flamme au plafond (Figure 1). Lorsque le foyer est soumis à une concentration plus faible en oxygène, son MLR chute. Néanmoins, il présente toujours deux régimes de combustion.

L'étude du remplissage du compartiment par les fumées a été poursuivie par le développement d'un modèle analytique. Il a été confronté à de premières données expérimentales mais cette validation n'est pas complètement satisfaisante.

Des simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel de CFD CALIF3S-Isis viennent en support de ces deux axes, leur objectif étant d'obtenir des informations complémentaires à celles issues des essais. Une validation basée sur un modèle de turbulence LES est en cours de réalisation afin de pouvoir interpréter physiquement les résultats obtenus.

Mots clés : foyers en hauteur, compartiment, incendie, CFD.

Figure 1 : Flamme impactante. Fort effet des flux thermiques rayonnés sur la combustion.

SUJET DE LA THÈSE

Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type

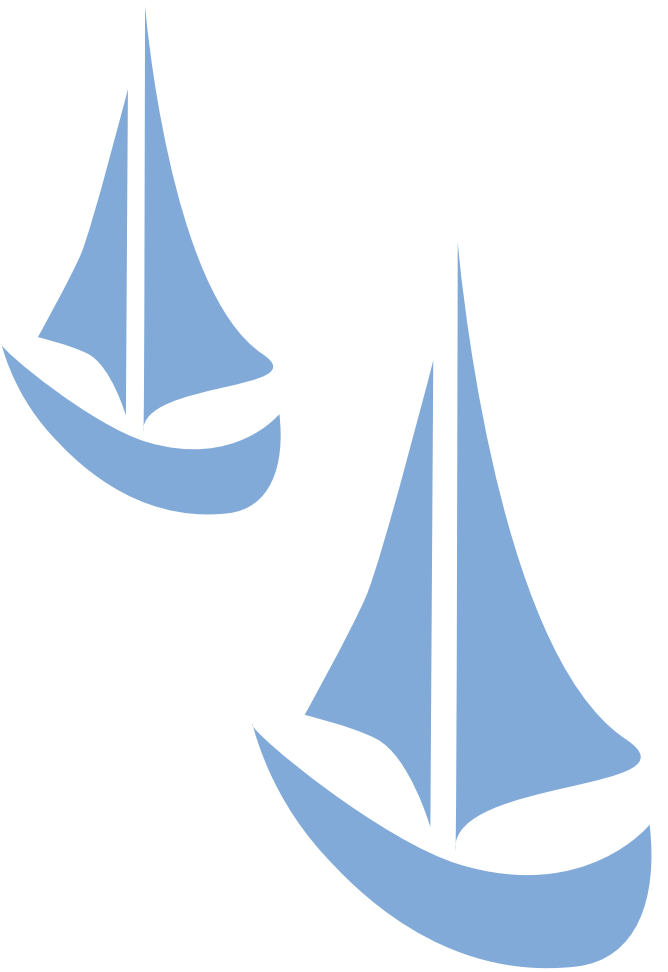
Doctorant :	Raphaël GAVART
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PDS-DEND / SESN / BMAX
Référent IRSN de la thèse :	Sophie TRELAT
Direction de thèse :	Nabiha CHAUMEIX / CNRS
École doctorale :	Lille - Énergie - Matériaux - Sciences de la terre et de l'univers - ED 552
Financement de la thèse :	IRSN & Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis

Aujourd'hui, les conflits armés, le terrorisme et les accidents industriels sont des préoccupations importantes pour les États et les personnes. Plusieurs entreprises et institutions, publiques ou privées, travaillent au développement d'outils analytiques et numériques pour évaluer les conséquences des actions malveillantes sur les structures et les personnes. Les activités de R&D développées par l'IRSN, au sein du bureau BMAX, visent, entre autres, à améliorer la connaissance des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle tridimensionnelle consécutive à une forte explosion et des obstacles de formes variées et des chargements mécaniques résultants dans le but de développer des modèles simplifiés utiles aux ingénieurs en charge des expertises. Cette thèse rentre dans le cadre de la coopération scientifique avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), dont les recherches comprennent le développement d'équipements de protection pour les personnels, véhicules et infrastructures.

Les travaux de thèse, supervisés par Nabiha Chaumeix (ICARE-CNRS-Orléans), Sophie Trélat (BMAX-IRSN Fontenay-aux-Roses) et Michel Sturtzer (PCE-ISL-Saint-Louis), s'inscrivent dans la continuité des activités développées à la DEND ayant pour objectifs (i) de développer des outils simples de prédiction des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle et un ou plusieurs obstacles indéformables, et (ii) d'en évaluer les profils temporels de pression à l'aide de diagnostics expérimentaux précis. Les expériences sont menées dans des installations à deux échelles distinctes : (i) échelle réduite sur la table à détonation de l'IRSN hébergée par ArianeGroup à Vert-le-Petit, (ii) échelle double sur la dalle d'essai à l'ISL située à Baldersheim en Alsace.

Durant ces deux premières années de thèse, l'interaction entre une charge d'Hexomax et une maquette hémicylindrique rigide a été examinée aux deux échelles. Les résultats de mesures de surpression à la surface de l'obstacle ont permis d'étendre l'approche du Modèle S décrit par Trélat *et al.* (2020). L'influence d'un second obstacle hémicylindrique au voisinage du premier a été investiguée à l'ISL, puis à l'IRSN lors d'une campagne expérimentale réalisée en septembre 2022. Des essais d'étalonnage des capteurs de pression ont été entrepris à l'ICARE. Finalement un outil numérique de recomposition d'images (en développement) permet d'assembler les prises de vue réalisées au cours de différents essais et ainsi de proposer une vision globale du contournement de l'onde à haute résolution. En perspective, une réflexion quant à l'influence de la déformation du matériau de la maquette sur le flux aérodynamique autour de celle-ci ainsi que le chargement mécanique consécutif est également à envisager.

Mots clés : onde de souffle, obstacle hémicylindrique, multi-échelle, explosif condensé.



Jeudi 30 mars

10 h 35 - 12 h 00 Salle 3 Fontaines

SESSION PLÉNIÈRE

AIDE À LA PRISE EN CHARGE DE VICTIMES D'IRRADIATION

Président : Dr François TROMPIER
Ingénieur-chercheur
(PSE-SAN / SDOS / LDRI)

Antonin DESCHEMPS - Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologique.

Lucie ANCEL - Nouveaux outils de diagnostic et pronostic moléculaires des brûlures radiologiques par approche « multi-omique ».

Mahinour MOBASHER - Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens.

Quentin TALLON - Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques. Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH.

Manon GUILLOU - Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle.

SUJET DE LA THÈSE

Apprentissage machine et réseaux de convolution pour une expertise augmentée en dosimétrie biologique

Doctorant :	Antonin DESCHEMPS
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Mohamed Amine BENADJAOUD
Direction de thèse :	Charles KERVRANN / INRIA
École doctorale :	Université Bretagne Loire - Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la communication (MATHSTIC) - ED 601
Financement de la thèse :	IRSN & région Bretagne

Questionnement scientifique et programme

La proportion d'aberrations chromosomiques dans les lymphocytes périphériques peut être utilisée pour estimer une dose de rayonnement ionisant. Cette proportion est liée à la dose par une relation linéaire quadratique (modélisée par une courbe de calibration). A l'IRSN, le Laboratoire de Radiobiologie des expositions Accidentelles (LRAcc) estime cette proportion en dénombrant manuellement les aberrations dans des images de métaphase Giemsa. Ce comptage manuel conduit à un délai d'analyse important du fait de la charge cognitive associée au comptage. L'objectif de cette thèse est de construire un outil de détection automatique, utilisant les réseaux convolutifs profonds. De part sa nécessité pour l'évaluation du risque radiologique, la dosimétrie concerne la plupart des grandes questions scientifiques de la radioprotection identifiées par l'IRSN. Cette thèse s'inscrit dans l'objectif d'évolution des outils de dosimétrie, pour une meilleure prise en charge des victimes en cas d'accident radiologique ou d'acte de malveillance.

L'outil principal mis à disposition par l'IRSN est une grande base de données annotée (~ 5 000 images), construite durant un audit de la base de données du LRAcc. Cette base de données est constituée d'images de métaphases, ainsi que de métadonnées indiquant le type et la localisation des aberrations présentes dans ces images. Elle a constitué un outil essentiel pour la production des résultats de la thèse.

Résultats

La base de donnée construite à l'IRSN a permis d'utiliser des modèles d'apprentissage profond de type Unet permettant de prédire pour chaque pixel de l'image une probabilité de présence d'abberration. Ces modèles ont donné des résultats très supérieurs à la solution semi-automatique utilisée actuellement au LRAcc (Metafer): Unet propose des précisions (pourcentage de détection) correctes et de rappel (pourcentage des objets à détecter correctement identifiés) significativement plus élevés.

Au delà de construire un modèle de détection performant, un autre objectif de la thèse est de pouvoir quantifier l'incertitude de prévision de ces modèles. Pour répondre à cette question, nous avons retenu une stratégie d'agrégation de modèle, qui cherche à imiter des processus de décision humain. En entraînant plusieurs modèles séparément, on peut construire plusieurs prédictions différentes pour une image donnée. Une aberration sera considérée comme détectée uniquement si elle fait consensus parmi les différents modèles. L'agrégation de modèles permet aussi d'améliorer significativement les performances par rapport au modèle unique. En effet, de nombreux objets considérés à tort comme des aberrations sont rejetés car ils ne sont pas détectés par tous les modèles.

Mots clés : dosimétrie biologique, apprentissage profond, vision par ordinateur, détection d'objet, modélisation d'incertitudes.

SUJET DE LA THÈSE

Nouveaux outils de diagnostic et pronostic moléculaires des brûlures radiologiques par approche « multi-omique »

Doctorante :	Lucie ANCEL
Date du début de la thèse :	04 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Stéphane FLAMANT
Direction de thèse :	Maamar SOUIDI / IRSN & Stéphane FLAMANT / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569
Financement de la thèse :	IRSN

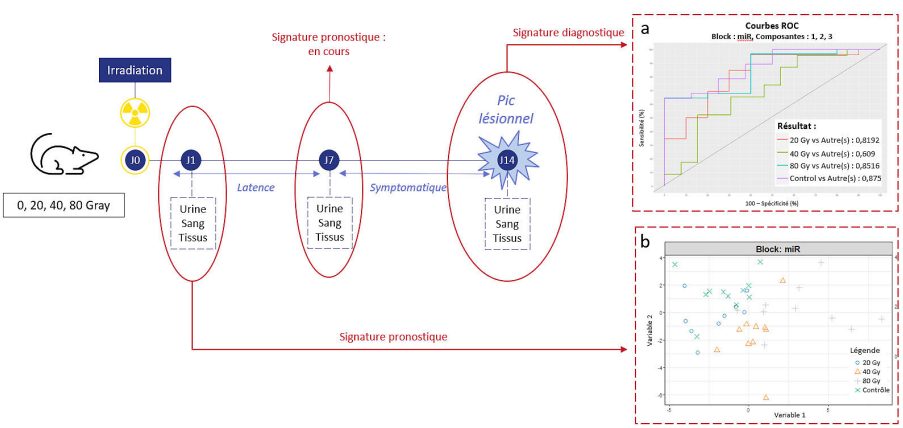
Le sujet de thèse s'inscrit dans le plan à moyen terme 2019-2023 de l'IRSN dans le domaine de la recherche en radioprotection, et répond notamment à la question 3 de la stratégie scientifique de l'institut qui concerne l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions aux rayonnements ionisants. L'objectif de cette thèse vise à identifier, par une approche globale de type « omique » appliquée à un modèle expérimental préclinique murin, de nouveaux marqueurs biologiques peu ou non invasifs (biofluides), à visée diagnostique et pronostique de la survenue et de la sévérité d'une brûlure radiologique.

La première partie de la thèse est consacrée à établir la preuve de concept de l'utilisation des biomarqueurs sélectionnés (microARNs et métabolites) ainsi qu'à l'identification de signatures moléculaires diagnostiques plasmatiques et urinaires associées à une lésion établie chez la souris. La seconde partie de la thèse concerne l'identification de signatures moléculaires pronostiques de la lésion radio-induite à l'aide de modèles précliniques asymptomatiques. Enfin, la dernière partie de la thèse a pour objet l'étude des mécanismes moléculaires associés à ces signature omiques.

Un criblage haut-débit (large spectre) des microARNs et métabolites réalisé sur des échantillons de sang (plasma) et d'urine prélevés sur une cohorte de souris (N=15/groupe) à J14 post-irradiation a conduit à l'identification de panels de biomarqueurs dont les variations d'expression permettent de distinguer les animaux selon leur groupe de dose. Ce premier résultat correspond à la preuve de concept de l'utilisation des microARNs et métabolites dans les fluides biologiques comme biomarqueurs moléculaires de la lésion radio-induite. Ces signatures font ensuite l'objet d'une étape de validation réalisée sur une cohorte de souris indépendante. Des analyses statistiques multivariées ont permis la validation d'une signature de microARNs plasmatiques associée à la sévérité de la lésion cutanée radio-induite (figure 1a). Concernant la recherche de signatures moléculaires pronostiques, réalisée sur des échantillons biologiques prélevés avant l'apparition des symptômes cliniques, le criblage haut-débit des microARNs plasmatiques a permis l'identification de marqueurs permettant la séparation des animaux selon leur groupe de dose dès J1 post-irradiation (figure 1b). Le reste des études est en cours.

Mots clés : lésion cutanée radio induite, signature moléculaire, biomarqueurs, microARNs, métabolites.

Résumé des travaux réalisés.
Les souris sont irradiées à J0 à différentes doses de rayons X via un appareil LINAC (0, 20, 40 et 80 Grays, N=15/groupe). Les prélèvements biologiques (sang et urine) réalisés à J14 après irradiation sont dédiés à la recherche de signatures diagnostiques de microARNs et de métabolites, ceux prélevés à J1 et J7 à la recherche de signatures pronostiques.
Les courbes ROC (a) reflètent les bonnes performances de la signature microARNs plasmatique à distinguer les groupes de doses les uns des autres à J14 post-irradiation. Le nuage de points (b) représente la capacité d'un panel de microARNs plasmatiques à distinguer les animaux selon leur groupe de dose à J1 post-irradiation. Les tissus prélevés aux différents temps serviront à l'analyse mécanistique.



SUJET DE LA THÈSE

Estimation of accidental radiation exposure by EPR measurements of induced point defects in smartphone screens

Doctorant :	Mahinour MOBASHER
Date du début de la thèse :	10 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LDRI
Référent IRSN de la thèse :	François TROMPIER
Direction de thèse :	Nadège OLLIER / École polytechnique
École doctorale :	Institut polytechnique de Paris - ED 626
Financement de la thèse :	IRSN

In case of a large-scale radiological accident with external exposure, there is no current method to sort out the exposed individuals and decide the immediate medical care. This thesis aims to participate in the development of a method of retrospective dosimetry with large throughput as a part of IRSN's strength line n°8 dedicated to developing methodologies and decision support tools of an operational nature. The proposed method is the use of smartphone touchscreen or protective glass for dose determination by using Electron paramagnetic Resonance spectroscopy (EPR). The advantage of the smartphones is its availability to everyone providing a fortuitous & quasi-universal dosimeter. Our goal is to build a robust analysis protocol to extract the main features of the EPR signals induced by irradiation among all unwanted signal components. The variability in composition of the tempered glass found in different smartphones is one of the main difficulties. Composition's changes induce different EPR radio-induced signatures and affect the sensitivity to dose. We need to study the variability of the EPR signal components in the various glass types. Thus, signals prior irradiation, induced by UV and ionizing radiation are studied in detail (thermal stability, UV effect on stability, dose sensitivity) to understand the mechanism and nature of radio-induced defects' formation. Glass chemical analysis will be preformed to facilitate these point defects' identification. Afterwards, we will produce our own glass with similar but controlled composition. Varying the concentration of elements possibly involved in the mechanism of formation in those lab-made glasses will help us to understand the different radio-chemical mechanisms. Once the nature of point defects is identified, it will be possible to simulate the different associated EPR components building up the spectra regardless of smartphone glass type providing a robust automated analysis approach. One of the leading companies for touchscreen production is Corning® featuring Gorilla® Glass (GG) generations (8 in total) where I am currently investigating its latest generations 5 & 7. They are known to be alkali-alumino-silicate glasses, but their compositions are not published. In GG5, two radio-induced components have been identified. After analysis of GG7 spectra, Fe3+ and Mn2+ ions have been identified. These ions, acting as quencher, could explain its lower sensitivity to dose. UVB Irradiation induces EPR components -contrarily to previous generations- that can be differentiated from the gamma-induced ones. It is worth noting that UVB irradiation generates less intense contribution in GG7 than in other type of GG.

Mots clés : large scale radiological accident, EPR, point defects, smartphone, glass, Gorilla glass.

SUJET DE LA THÈSE

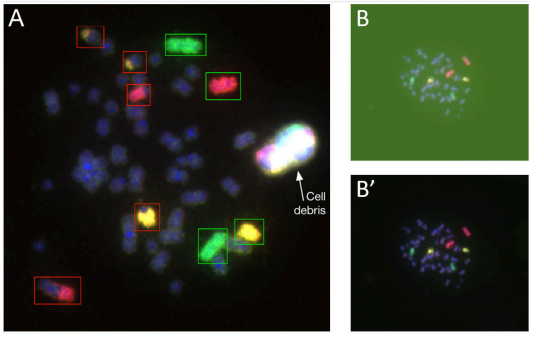
Intelligence Artificielle pour la détection automatique de translocations chromosomiques. Application à la dosimétrie rétrospective basée sur l'imagerie FISH

Doctorant :	Quentin TALLON
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Mohamed Amine BENADJAOUD
Direction de thèse :	Charles KERVRANN / INRIA
École doctorale :	Université Bretagne Loire - Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - ED 601
Financement de la thèse :	IRSN & Agence Innovation Défense

Suite à une exposition accidentelle à des rayonnements ionisants, il est nécessaire d'affiner l'évaluation de la dose reçue pour effectuer un tri efficace des victimes asymptomatiques. Parmi les techniques disponibles, la dosimétrie biologique réalisée sur des prélèvements sanguins consiste à dénombrer les aberrations chromosomiques au sein des lymphocytes circulants. Du fait qu'elle constitue une donnée nécessaire au risque radiologique, la dosimétrie concerne la plupart des grandes questions scientifiques de la radioprotection identifiées par l'IRSN. Un des objectifs qui se dégage alors est l'évolution des outils pour une meilleure prise en charge des victimes en cas d'accident radiologique ou d'acte de malveillance.

Ce projet de thèse s'intéresse particulièrement aux aberrations chromosomiques stables, car elles persistent au cours des divisions cellulaires et peuvent servir de base à une reconstitution dosimétrique plusieurs années après l'exposition. La technique d'imagerie cytogénétique de référence est l'hybridation *in situ* par fluorescence (FISH). L'objectif est de développer un modèle d'intelligence artificielle capable de détecter automatiquement ces aberrations dans ces images FISH. Il conviendra ensuite d'effectuer une validation statistique et dosimétrique de ce modèle.

Les difficultés proviennent du nombre restreint d'annotations des données, ce qui constitue un défi pour l'apprentissage deep learning. L'idée est alors de développer des techniques capables à la fois de tirer parti d'annotations spatiales, mais aussi de la majorité de données non annotées. Le Faster-RCNN, réseau de neurones de détection d'objets, est particulièrement pertinent ici car il permet de simultanément localiser et de classer les chromosomes. Nous obtenons de très bons résultats sur la détection de chromosomes fluorescents, mais la distinction d'aberrations reste difficile. Pour contourner cette difficulté, nous avons opté pour une classification au niveau des instances fluorescentes via des réseaux ResNet. Cette approche a conduit à la construction d'un pipeline « multi-échelle ». Ensuite, afin d'obtenir un gain de performances, nous avons exploré l'impact du filtrage et du prétraitement de nos images. Des techniques de matching d'histogramme, combinées à des critères d'espacement d'objets, ont permis une augmentation significative des scores de performance ; dans les travaux futurs, nous envisageons d'améliorer la transférabilité d'un modèle entraîné en continuant à étudier les techniques d'adaptation de domaine.



Mots clés :
intelligence artificielle, dosimétrie biologique, détection d'objets, imagerie microscopique, apprentissage profond.

Figure : (A) Détection des translocations d'une image FISH, les boites indiquent la localisation des éléments d'intérêts (chromosomes fluorescents) : en vert les non-aberrants, en rouge les aberrants. (B) Image FISH avant prétraitement. (B') Image FISH après prétraitement.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation dosimétrique et évaluation des lésions radio-induites après irradiation dans les conditions de la radiologie interventionnelle

Doctorante :	Manon GUILLOU
Date du début de la thèse :	28 / 09 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Morgane DOS SANTOS
Direction de thèse :	Yolanda PREZADO / CNRS
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

La radiologie interventionnelle (RIn), utilisée pour le diagnostic et le traitement de diverses pathologies, est guidée par une imagerie de rayons-X de basse énergie (BE). Majoritairement bénéfique et maitrisée, des surexpositions accidentelles peuvent néanmoins se produire et des doses élevées (>10Gy) peuvent être délivrées localement conduisant à l'apparition d'effets déterministes. Ainsi, ce sujet s'inscrit dans la stratégie scientifique de l'IRSN, dans le domaine de la radioprotection qui vise à mieux identifier et prévenir les effets secondaires après exposition à des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques ou thérapeutiques. En effet, le manque de connaissances des conséquences biologiques à BE rend le pronostic du patient difficile et incertain du fait de la spécificité de ce type d'exposition.

Un nouveau modèle murin d'irradiation localisée a été développé sur le SARRP à 80kV, permettant de mimer les lésions radio-induites lors de surexpositions accidentelles en RIn. Les souris sont irradiées selon différents protocoles : expositions uniques (Kair=15, 30 ou 45Gy) ou répétées (Kair=2x15 ou 3x15Gy) séparées d'une semaine, puis suivies quotidiennement jusqu'à 84 jours post-irradiation par scoring, photos, pesées et mesures du flux sanguin (doppler). Ce modèle est caractérisé dosimétriquement par simulations Monte Carlo afin d'obtenir une cartographie 3D de la dose dans les différents tissus (os, moelle et muscle) et par mesures expérimentales (spectroscopie RPE) sur l'os à différents temps post-irradiation. Des mesures histologiques et au microCT sont réalisées sur les os et les muscles pour caractériser les spécificités radiopathologiques.

Le suivi lésionnel longitudinal permet de classer les protocoles en fonction de la sévérité des brûlures radio-induites. La double validation dosimétrique par spectroscopie RPE et simulations Monte Carlo met en évidence la forte hétérogénéité du dépôt de dose à BE, avec une dose à l'os et à la moelle respectivement 7,1 et 1,6 fois plus élevée que celle mesurée dans l'air et la forte dépendance de la dose avec la composition, en calcium notamment, des matériaux. La perte de signal RPE au cours du temps suppose la mise en place des processus biologiques de renouvèlement osseux. Les mesures au microCT montrent une diminution du volume trabéculaire pour les protocoles les plus sévères. L'analyse histologique montre une désorganisation des cellules (chondrocytes), du plateau tibial, indispensables au renouvèlement osseux et une augmentation des adipocytes dans la moelle à des temps précoces (J14). Les doses à la moelle étant élevées, des analyses sanguines (NFS) sont en cours pour évaluer l'impact d'une surexposition accidentelle localisée en systémique.

Mots clés : dosimétrie, radiopathologie, brûlures radio induites, radiologie Interventionnelle, rayons X de basses énergies.

Jeudi 30 mars

14 h 30 - 15 h 45 Salle Camargue

DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE ET DÉPÔT DES RADIONUCLÉIDES

Présidente : Irène KORSAKISSOK
Chercheuse en physico-chimie de l'atmosphère
(PSE-SAN / SESUC / BMCA)

Youness EL-OUARTASSY - Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejets accidentels dans l'atmosphère.

Hanane BOUNOUAS - Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti.

Déo Gratias Kily SOURABIE - Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie.

Emmanuel REYES - Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : Modélisation explicite du flux de Stefan et de la contribution de la diffusiophorèse.

SUJET DE LA THÈSE

Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejets accidentels dans l'atmosphère

Doctorant :	Youness EL-OUARTASSY
Date du début de la thèse :	09 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESUC / BMCA
Référent IRSN de la thèse :	Irène KORSAKISSOK
Direction de thèse :	Matthieu PLU / CNRS-Météo france
École doctorale :	Toulouse 3 - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - ED 173
Financement de la thèse :	IRSN & Météo France

Les modèles de dispersion atmosphérique sont utilisés lors d'un accident nucléaire pour aider à la gestion de crise, par exemple pour prédire la dose susceptible d'être reçue par les populations lors du passage du panache des radionucléides rejetés dans l'atmosphère. Cependant, il est indispensable de prendre en compte les incertitudes inhérentes à ces simulations. L'une des sources de ces incertitudes est la météorologie utilisée pour alimenter les modèles.

Dans la première partie de cette thèse, nous avons utilisé l'ensemble météorologique à fine échelle de Météo-France PEAROME, conjointement avec le modèle de dispersion pX développé à l'IRSN/BMCA, pour intégrer l'incertitude météorologique aux simulations de la dispersion. Pour évaluer la qualité des simulations PEAROME-pX ainsi construites, des mesures réalisées par l'IRSN/LRC de la concentration dans l'air du ^{85}Kr, rejeté par l'usine de retraitement d'ORANO La Hague, ont été utilisées. Les résultats mettent en évidence l'apport de l'utilisation des ensembles à fine échelle par rapport à une prévision déterministe (El-Ouartassy *et al.*, 2022).

Les travaux présentés dans cette deuxième partie de thèse portent sur les contraintes liées au temps de calcul qui limitent l'utilisation de tous les membres d'un ensemble météorologique en situation de crise. Pour répondre à cette problématique, l'une des pistes est la réduction du nombre de simulations composant l'ensemble météorologique utilisé en entrée du modèle de dispersion, par la sélection des membres représentatifs (« clustering »). Plusieurs algorithmes de Machine Learning sont utilisés en météorologie pour optimiser les systèmes de prévisions d'ensemble. Dans cette étude, on compare la performance statistique de trois méthodes de clustering : K-means, Agglomératif Hiérarchique et Ward.

Le vent étant l'une des variables météorologiques les plus influentes pour la dispersion atmosphérique, les trois méthodes de clustering sont appliquées aux champs du vent, afin de classifier les membres météorologiques de la PEAROME en sous-groupes (ou clusters) similaires. Ensuite, un indice de représentativité est calculé pour les membres de chaque cluster afin de sélectionner le membre représentatif qui sera utilisé pour le calcul de la dispersion atmosphérique.

L'objectif de cette étude est de répondre aux questions suivantes: peut-on construire des clusters pertinents pour la dispersion en utilisant le vent comme variable prédictive ? Quelle est la meilleure méthode du clustering pour une perspective opérationnelle ? Est-ce que le clustering permettra de détecter seulement les zones de fortes probabilités de dépassement d'un seuil donné ou également celles de faibles probabilités ?

Mots clés : dispersion atmosphérique, PEAROME-pX, clustering.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation expérimentale et modélisation de la dispersion atmosphérique en vent faible et en milieu bâti

Doctorante :	Hanane BOUNOUAS
Date du début de la thèse :	29 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Référent IRSN de la thèse :	Pierre ROUPSARD
Direction de thèse :	Yelva ROUSTAN / École des Ponts
École doctorale :	COMUE Paris Est - Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE) - ED 531
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Les études d'impact des émissions atmosphériques de radionucléides prennent en compte l'ensemble des conditions météorologiques représentatives des sites. Pour les épisodes de vent faible, les calculs d'impact présentent de fortes incertitudes. Les mécanismes de dispersion et les propriétés de la turbulence dans ces situations sont modifiés et favorisent la stagnation des radionucléides émis dans l'atmosphère. L'amélioration de la compréhension et de la modélisation de ces situations se heurte à un manque de données au niveau international, particulièrement pour le milieu bâti.

Cette thèse comporte à la fois un volet expérimental et un volet modélisation. L'objectif est d'acquérir des données expérimentales (mesures de vent, turbulence, et de concentration) de dispersion d'un gaz traceur (Hélium), les analyser pour caractériser les processus pilotant la dispersion (notamment le méandrement) ainsi que définir et valider une méthodologie de modélisation. Le site d'étude est le SIRTA (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique). C'est un milieu péri-urbain situé à Palaiseau dont la hauteur des bâtiments varie entre 5 et 30 m. Une deuxième campagne de mesure a été réalisée en 2022 complémentaire aux données déjà acquises en 2020. Les concentrations d'Hélium sont mesurées à partir de prélèvements d'air analysés a posteriori par un spectromètre de masse et en temps réel à l'aide de spectromètres de masse disposés dans le champ proche du point d'émission (<300 m). Les conditions de turbulence sont mesurées par des anémomètres à ultrasons positionnés sur un mât de 30 m à différentes hauteurs et à plusieurs endroits à l'intérieur du milieu bâti. Les coefficients de transfert atmosphérique (en $s.m^{-3}$) sont déterminés pour quantifier la dispersion du panache.

Le méandrement est caractérisé par un comportement oscillant de la fonction d'autocorrélation eulérienne avec présence d'une boucle négative pour les composantes horizontales u et v de la vitesse du vent. La fonction d'autocorrélation de la composante verticale w présente une courbe exponentielle classique. Les périodes de ce processus varient entre 10 et 60 minutes dans la première campagne expérimentale. Le méandrement disperse le panache sur une plage angulaire assez large. L'analyse des séries temporelles met en évidence l'oscillation de la direction du vent en vent faible. Ultérieurement une troisième campagne sera effectuée pour consolider la base de données. Une modélisation CFD sera réalisée en définissant une méthodologie de prise en compte du caractère fortement instationnaire de la dispersion et en adaptant la théorie de la similitude de Monin-Obukhov pour représenter la couche de surface.

Mots clés : dispersion, vent faible, milieu bâti.

SUJET DE LA THÈSE

Quantification expérimentale et modélisation opérationnelle des dépôts secs et humides de chlore 36 sur une prairie

Doctorant :	Déo-Gratias Kily SOURABIE
Date du début de la thèse :	05 / 10 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRC
Référent IRSN de la thèse :	Didier HÉBERT
Direction de thèse :	Lucilla BENEDETTI / AMU & Denis MARO / IRSN
École doctorale :	AMU - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Le chlore 36 (36Cl, T1/2 = 301 000 ans) est un radionucléide d'origine naturelle et artificielle susceptible d'être rejeté lors des opérations de démantèlement de centrales nucléaires ou chroniquement lors du recyclage des déchets nucléaires. Une fois émis dans l'atmosphère, le $_{36}$Cl (gaz et particules) peut être transféré vers le sol par des dépôts secs et humides. Cependant, les connaissances sur ces dépôts sont très parcellaires. Or, du fait de sa mobilité relativement élevée dans la géosphère et de sa biodisponibilité importante, le $_{36}$Cl est un radionucléide dont l'étude du devenir dans l'environnement constitue un enjeu pour les études d'impacts.

Ainsi, cette thèse a pour objectifs la quantification des dépôts de chlore 36 sur une prairie et la modélisation des dépôts en fonction des paramètres atmosphériques. Pour cela, un dispositif de prélèvement (gaz, particules, eau de pluie et herbes) et de mesure des paramètres micrométéorologiques a été installé sur le site de la plateforme technique IRSN La Hague (PTILH) située à 2 km de l'usine Orano-la Hague, émetteur chronique du 36Cl en faible quantité. Les échantillons ont ensuite été préparés chimiquement pour la mesure du chlore 36 par spectrométrie de masse par accélération AMS-ASTER au CEREGE.

Les mesures de $_{36}$Cl variaient de 0,9 à 50 nBq.m^{-3} pour les gaz, de 0,6 à 14 nBq.m^{-3} pour les particules, 34 à 374 µBq.m^{-2} dans l'herbe, et de 9 à 23,6 µBq.l^{-1} dans l'eau de pluie. Ces mesures ont permis de calculer des flux de dépôt compris entre 1,4.10^{-2} et 1,9.10^{-1} nBq.m^{-2}.s^{-1} par temps sec et entre 2.10^{-1} et 6.10^{-1} nBq.m^{-2}.s^{-1} par temps humide. Les vitesses de dépôt sec sur l'herbe (gaz et particules) oscillaient entre 1,4.10^{-3} et 7,3.10^{-3} m.s^{-1}. Pour modéliser les dépôts secs, le modèle du LRC (Damay-Pellerin) a été utilisé pour les particules et le modèle de dépôt des gaz a été adapté du modèle de Bah (2020) développé pour l'iode gazeux. Les vitesses de dépôts sec calculées par le modèle montrent moins d'un ordre de grandeur d'écart par rapport à celles obtenues expérimentalement. Quant aux dépôts humides de 36Cl, la modélisation a été réalisée à partir du calcul des coefficients de rabattement du $_{36}$Cl gazeux et particulaire. Les résultats montrent un rabattement plus important pour les gaz et le modèle développé calcule des dépôts humides théoriques de $_{36}$Cl 3 à 10 fois inférieurs aux mesures expérimentales dans l'eau de pluie.

Mots clés : Chlore 36, modélisation, dépôts, AMS.

SUJET DE LA THÈSE

Établissement d'un modèle théorique pour la collecte des aérosols par les gouttes de pluie : Modélisation explicite du flux de Stefan et de la contribution de la diffusiophorèse

Doctorant :	Emmanuel REYES
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SCA / LPMA
Référent IRSN de la thèse :	Pascal LEMAITRE
Direction de thèse :	Alain BERLEMONT / Université de Rouen
École doctorale :	Normandie université - Physique, Sciences de l'Ingénieur, Matériaux, Énergie (PSIME) - ED 591
Financement de la thèse :	IRSN & région Normandie

Question scientifique pour l'IRSN : Améliorer la connaissance de la contamination des écosystèmes pour prévoir l'estimation dosimétrique pour les populations en situation accidentelle.

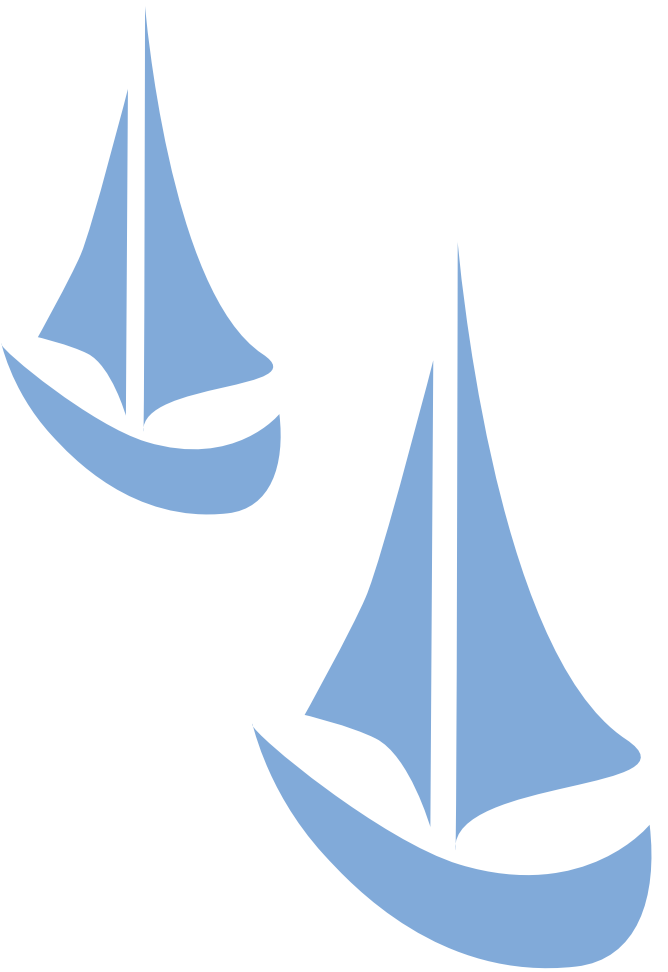
Lors d'un accident nucléaire, une importante fraction des rejets radioactifs se fait sous la forme d'aérosols. Le lessivage par les gouttes de pluie est un des seuls mécanismes efficaces pour lessiver les aérosols appartenant au *mode accumulation* de l'aérosol atmosphérique. Ce lessivage est décrit par un paramètre microphysique appelé efficacité de collecte qui décrit la fraction de particules collectée par une goutte lors de sa chute. Le but de ma thèse est d'établir un modèle théorique permettant de déterminer cette efficacité de collecte pour des gouttes de pluie. La méthodologie repose sur des suivis lagrangiens des particules dans des écoulements simulés en DNS. Cependant, un verrou scientifique majeur persiste car pour des nombres de Reynolds supérieurs à 500 les gouttes, à leur vitesse limite de chute, oscillent à grande fréquence et se déforment fortement. Néanmoins, des approches hybrides couplant les méthodes *Level-Set, Ghost-Fluid* et *Volume of Fluid* ont été développées à l'université de Rouen et intégrées à un code appelé ARCHER.

Dans la première partie de ma thèse, j'ai intégré dans ARCHER, un modèle lagrangien de suivi de particules. Puis, je me suis concentré sur la validation des efficacités de collecte déduites de ces suivis lagrangien pour des configurations ou il existe soit une solution analytique des équations de Navier-Stokes (Re < 1, Hadamard et Rybczynski, 1911), soit des simulations possibles car la goutte reste parfaitement sphérique (Re < 400, Cherrier *et al.* 2016). Pour ces premières simulations, j'ai considéré, dans l'équation de transport des aérosols, les forces de traînée, la gravité et le mouvement Brownien.

La deuxième partie de la thèse a été consacrée aux simulations de gouttes de grand diamètre (Re > 500) où les effets d'oscillations sont déjà présents. Aucun résultat de validation de l'écoulement n'existe à ce stade. Cependant, il existe quelques paramètres qui m'ont permis de valider la goutte tout au long des simulations : rapport d'axe, amplitudes d'oscillation, fréquences d'oscillation et vitesse terminale de chute. Les résultats de ces simulations sont en accord avec les données expérimentales de la littérature.

La suite sera dédiée à l'intégration d'un modèle qui permet de modéliser l'évaporation de la goutte et plus particulièrement le flux de Stefan. Pour cela il est envisagé d'implémenter le modèle de Tanguy *et al.* (2007) et calculer les effets phorétiques (thermophorèse et diffusiophorèse) explicitement.

Mots clés : aérosol, Brownien, déformation, DNS, efficacité de collecte, goutte, Lagrangien, lessivage, *Level-Set*, oscillation, VOF.



Jeudi 30mars

14 h 40 - 15 h 45 Salle 3 Fontaines

COMPORTEMENT / TRANSFERT DES AÉROSOLS ET DES PRODUITS DE FISSION

Président : Dr Philippe NERISSON
Chercheur
(PSN-RES / SEREX / L2EC)

Mariam SAAB - Remobilization of fission products (FPs) impacting the delayed source Term.

Rémy PLOIX - Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosols dans les bifurcations des réseaux de ventilation.

Julie NGUYEN SADASSIVAME - Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares (Xe, Kr) par des matériaux poreux innovants de type Metal-Organic Framework (MOF).

Karim ABBAS - Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés.

SUJET DE LA THÈSE

Remobilization of fission products (FPs) impacting the delayed source Term

Doctorante :	Mariam SAAB
Date du début de la thèse :	15 / 03 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SAM / LETR
Référent IRSN de la thèse :	Sidi SOUVI
Direction de thèse :	Monica CALATAYUD-ANTONINO / Sorbonne Université
École doctorale :	Chimie physique et chimie analytique de Paris Centre - ED 388
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

The ASTEC code is the integral code used to perform the simulation of all phenomena occurring during a reactor meltdown accident, from the initiating event up to the release into the environment. The ASTEC simulation of the FPs behavior have shown some discrepancies in the quantitative prediction of observations in the Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BSAF), as well as some detailed interpretations of Phebus FP and CHIP experiments. These works have highlighted to consider more in detail the reactions of the FPs of interest with aerosols and surfaces (which promote their trapping in the facilities), as well as their remobilization from the surfaces into the gaseous phase, and thus their contribution to a potential release into the environment in the medium and long terms. Some experimental works have been initiated in the ESTER project and theoretical chemistry approaches have been developed to explore atomic-scale mechanisms between the surfaces and gases.

Molybdenum oxide is of particular interest because Mo, having a high fission yield, can interact with some other fission products (*e.g.* Cs), favoring in some conditions the gaseous iodine fraction. Thus, the main objective of the thesis is to improve the ASTEC modelling by providing thermodynamic and kinetic data about the surface reactivity of molybdenum oxide.

To achieve this goal, an extensive ab-initio study of molybdenum trioxide surface reactivity deposited in the primary circuit using Density Functional Theory was performed. We first focused our study on two phenomena: activated dissociation of CsI and non-congruent condensation of $CsHMoO_4$, both important species for the iodine transport simulation.

First, the Gibbs energies of adsorption and dissociation of CsI on O- and Mo-terminated surfaces are determined as a function of temperature. As result, Mo-surface doesn't activate CsI dissociation to form I_2, whereas O-terminated surface does because the Gibbs energies of adsorption and dissociation occur in the same temperature range of 350–550 K. These results are consistent with Bader charge analysis, in which the I on the O-terminated surfaces show higher charge loss compared to the Mo-terminated surface case, confirming that CsI dissociation is more likely to occur on the O-terminated surface and, therefore, favoring the interaction with a neighboring iodine.

Concerning $CsHMoO_4$, it is found that the non-congruent condensation on both surfaces is unlikely, since the adsorption and dissociation are not thermodynamically possible at the same temperature intervals.

Mots clés : ASTEC, DFT, surface's chemistry, activated dissociation, noncongruent condensation.

SUJET DE LA THÈSE

Étude numérique et expérimentale du dépôt d'aérosols dans les bifurcations des réseaux de ventilation

Doctorant :	Rémy PLOIX
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SCA / LEMAC
Référent IRSN de la thèse :	Jeanne MALET
Direction de thèse :	Evelyne GEHIN / Université Paris-Saclay & Jeanne MALET / IRSN
École doctorale :	COMUE Paris Est - Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE) - ED 531
Financement de la thèse :	IRSN & Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne

Dans le cadre du développement du logiciel SYLVIA par l'IRSN, des modèles de dépôt d'aérosols dans les singularités récurrentes des réseaux de ventilation industriels telles que les coudes, les bifurcations et les réductions de section sont nécessaires et nécessitent des données expérimentales. L'IRSN a donc construit l'installation DIESE et définit le programme expérimental DEPART, dans lequel s'inclut cette thèse dont l'objectif est de s'intéresser plus spécifiquement aux bifurcations.

Au cours de la première année, le protocole expérimental pour la mesure du dépôt d'aérosol, développé par Costa (2022), a été adapté et appliqué aux bifurcations. Trois essais ont été réalisés : deux dans les mêmes conditions et la même bifurcation pour tester la répétabilité de la mesure, et un troisième sur une bifurcation de géométrie plus abrupte. Par ailleurs, un travail spécifique sur le type de grandeur à mesurer pour caractériser le dépôt a été réalisé. En effet, dans la littérature, les études traitant du dépôt des aérosols utilisent la notion de vitesse de dépôt d'aérosol, adimensionnée par une vitesse de frottement dépendant des conditions de l'expérience (rugosité de la paroi, nombre de Reynolds). Cette vitesse de frottement a fait l'objet d'une campagne de mesure (Figure 1). Cette campagne a mis en évidence des variations de la vitesse de frottement et d'incertitudes de mesure en fonction des conditions expérimentales, notamment selon la position Y en amont ou en aval de la perturbation mais également en fonction de la position de mesure H sur la paroi verticale de la gaine. Ces résultats mettent en évidence la difficulté à utiliser la vitesse de dépôt adimensionnée par la vitesse de frottement moyenne pour analyser les résultats de dépôt local dans des zones où l'écoulement est non établi ou perturbé. Suite à ce constat, nous avons développé une méthodologie spécifique pour remonter au dépôt global dans les bifurcations. Cette méthodologie passe, en particulier, par l'utilisation de la simulation CFD, qui constitue le volet numérique de la thèse. Ce dernier a été pris en main et sera poursuivi au cours de la deuxième année de thèse.

Mots clés : aérosol, dépôt, singularités, vitesse de frottement, bifurcation.

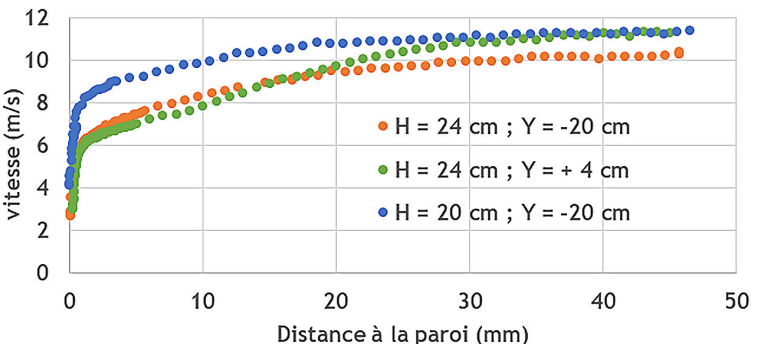


Figure 1. Profils horizontaux de vitesse moyenne longitudinale en couche limite sur une paroi verticale de DIESE servant à la détermination de la vitesse de frottement à différentes hauteurs H (H = 0 cm en bas de la paroi) dans la gaine et distances Y d'une perturbation de surface.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares (Xe, Kr) par des matériaux poreux innovants de type *Metal-Organic Framework* (MOF)

Doctorante : Julie NGUYEN-SADASSIVAME

Date du début de la thèse : 05 / 10 / 2020

Laboratoire IRSN : PSN-RES / SEREX / L2EC

Référent IRSN de la thèse : Philippe NERISSON

Direction de thèse : Christophe VOLKRINGER / Université Lille 1 & Thierry LOISEAU / École nationale supérieure de chimie de Lille

École doctorale : Lille - Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement (SMRE) - ED 104

Financement de la thèse : IRSN

Le Xénon et le Krypton sont des gaz rares produits massivement par fission au sein du combustible nucléaire. En situations accidentelles, le rejet de ces gaz dans l'atmosphère peut générer une exposition significative à court et moyen termes (Xe-133 de demi-vie 5,3 jours, Kr-85 10,8 ans). Très peu réactifs chimiquement, ces gaz sont difficilement piégeables et séparables. Or, une nouvelle classe de matériaux poreux nommés MOFs (*Metal-Organic Frameworks*) a démontré des capacités de piégeage efficace vis-à-vis du CO_2, de différents PFs volatils (I, Ru), ainsi que des gaz rares en conditions douces. En effet, ces matériaux cristallins hybrides métal-ligand, sont modulables à souhait avec des diamètres de pores variables et une surface spécifique très élevée (jusqu'à 7000 m²/g). L'objectif de la thèse est donc d'étudier la faisabilité de piégeage des gaz rares par ces matériaux poreux de type MOF en situation d'accident grave. Cela permettra à terme, d'améliorer l'efficacité des dispositifs de filtration dédiés et de limiter le transfert de la contamination vers l'environnement en situation d'accident grave (question de recherche S1) .

Ce travail de thèse consiste d'une part à synthétiser et caractériser des MOFs (surface spécifique BET, DRX, ATG, MEB-EDX...) ainsi qu'à estimer leur capacité de piégeage des gaz rares en condition statique. Ces matériaux, synthétisés à l'UCCS (UMR 8181, Villeneuve d'Ascq), sont sélectionnés en fonction de leurs structures et fonctionnalisations, notamment par l'insertion de nanoparticules métalliques telles que l'argent (dopage), susceptibles d'optimiser la capture des gaz rares. D'autre part, le temps de percée et l'efficacité de piégeage de ces gaz, au sein des MOFs sélectionnés, sont évalués en dynamique sur le banc expérimental SAFARI de l'IRSN (L2EC, Cadarache). Ce banc permet de reproduire différents paramètres représentatifs d'un accident grave susceptible de survenir sur un REP (température, humidité, vitesse de passage, concentration).

Les résultats en condition statique ont permis de sélectionner des MOFs prometteurs pour la capture des gaz rares. Le solide HKUST-1, étudié dans la littérature, a permis d'adapter le banc SAFARI pour la filtration des gaz rares, notamment par le développement d'une méthode d'analyse en ligne par chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS). Par la suite, sont étudiés sur le banc dynamique, différents MOFs à base de zirconium (UiO-66), fonctionnalisés par des groupements organiques (-NH_2, -2COOH, -COOH...) et à base d'aluminium (MOF-303, MIL-100), dopés à l'argent.

Mots clés : gaz rares, piégeage, matériaux microporeux, argent, étude expérimentale.

SUJET DE LA THÈSE

Une approche innovante pour la quantification de la contribution due à l'échange isotopique dans le piégeage des effluents iodés

Doctorant :	Karim ABBAS
Date du début de la thèse :	09 / 02 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SCA / LECEV
Référent IRSN de la thèse :	Mouheb CHEBBI
Direction de thèse :	Bruno AZAMBRE / Université de Lorraine
École doctorale :	Lorraine - C2MP - Chimie Mécanique Matériaux Physique - ED 606
Financement de la thèse :	IRSN, EDF & CEA

Les charbons actifs (CA) sont utilisés comme adsorbants dans les pièges à iode (PAI) au sein des réseaux de ventilation de la plupart des installations nucléaires françaises dans le but de prévenir la dissémination d'espèces iodées volatiles dans l'environnement. Ces adsorbants sont classiquement fonctionnalisés avec de la triéthylènediamine (TEDA) et de l'iodure de potassium (KI) afin de garantir un piégeage efficace. Pour vérifier l'efficacité de ces PAI des tests périodiques réglementaires sont requis à l'aide d'un gaz radioactif (^{131}I) et conduisent, paradoxalement, à des rejets dans l'environnement. Les travaux de cette thèse ont donc pour objectif de développer un test d'efficacité des PAI ne mettant pas en œuvre d'effluent radioactif. La validité d'un tel test repose néanmoins sur la quantification de la réactivité de KI avec l'iode radioactif (échange isotopique, EI) dont l'importance a été confirmée par Lin [1].

Mes travaux s'attachent donc à comprendre plus finement cette réactivité. Il s'agit de quantifier, d'une part le mécanisme d'EI sur des CA ayant une composition similaire à celle des CA utilisés dans l'industrie nucléaire, d'autre part l'influence des conditions opératoires. Ce volet vise à établir *in fine* un coefficient de sûreté entre les essais à l'iode radioactif et ceux à l'iode stable. Un second volet a pour objet de mieux cerner les facteurs d'influence du "matériau" sur l'efficacité et la cinétique de la réaction d'EI. Pour cela, des supports poreux modèles iodés, synthétisés à l'échelle du laboratoire, seront testés, en combinant des études d'EI en phases liquide et gazeuse. Ainsi, un support de type alumine (inerte pour la physisorption), a été imprégné dans un premier temps avec différentes teneurs et états de dispersion de KI. Un échantillon d'alumine imprégné avec 30 wt% en KI (dilué dans le sable) a été par la suite testé vis-à-vis de la capture de CH_3I radioactif. La figure 1(b) montre une saturation immédiate de ce support, indiquant l'absence de toute rétention. En revanche, une certaine rétention s'accompagnant par un retard dans le profil de percée a été observée en présence d'un CA imprégné avec 5% en KI (dilué dans le sable). Ce premier résultat montre l'importance de tester d'autres supports microporeux favorisant l'adsorption physique de CH_3I.

[1] : H. Lin, "Évaluation de la contribution du mécanisme d'échange isotopique à l'épuration de l'iode radioactif", Thèse Sorbonne Université, 2022.

Mots clés : adsorption, iode radioactif, sûreté nucléaire, charbons actifs, échange isotopique.

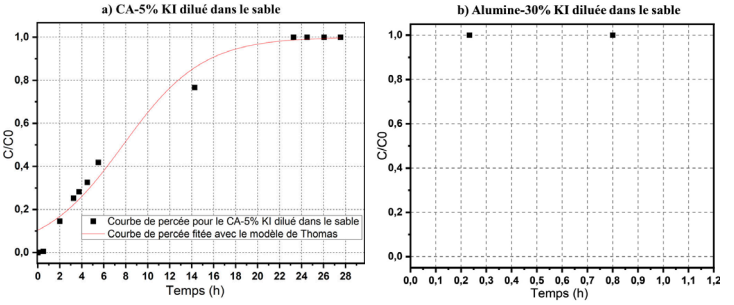
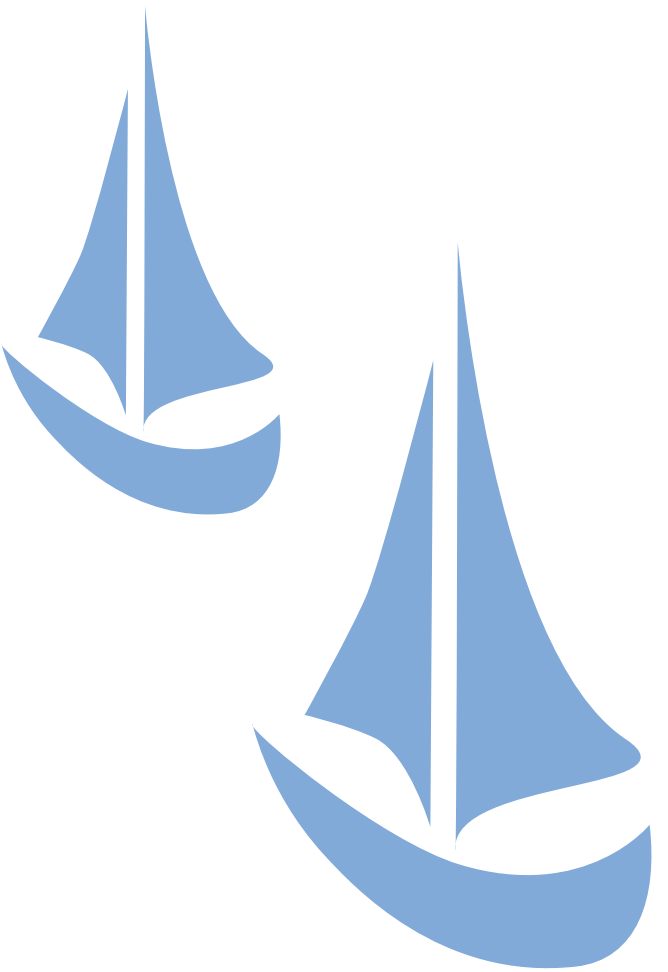


Figure 1. Courbes de percée de $CH_3{}^{131}I$: a) CA imprégné à 5% KI dilué dans le sable b) Alumine imprégnée à 30% KI diluée dans le sable ($[CH_3I]total$ = 5 ppmv, rapport isotopique $^{131}I/^{127}I$= 5 × 10-10, T = 20°C, H.R = 0%, temps de séjour = 0,2 s, épaisseur du lit = 5 cm).



Jeudi 30 mars

16 h 15 - 17 h 05 Salle 3 Fontaines

SESSION PLÉNIÈRE

EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION DU COMBUSTIBLE EN CONDITIONS ACCIDENTELLES

Président : Marc BARRACHIN
Adjoint au chef de service des accidents majeurs
(PSN-RES / SAM)

Apou Martial KPEMOU - Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5-Framatome après une sollicitation de type APRP.

Théo ROUBILLE - Étude théorique de la microstructure et du comportement des produits de fission dans le combustible d'oxyde d'uranium dopé à l'oxyde de chrome.

Jinjiang CUI - Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF (*Accident Tolerant Fuel*).

SUJET DE LA THÈSE

Hydruration secondaire et fragilisation d'une gaine M5-Framatome après une sollicitation de type APRP

Doctorant : Apou Martial KPEMOU

Date du début de la thèse : 13 / 09 / 2021

Laboratoire IRSN : PSN-RES / SEREX / LE2M

Référent IRSN de la thèse : Jean DESQUINES

Direction de thèse : Marie-Christine BAIETTO / INSA Lyon

École doctorale : Lyon COMUE - MEGA de Lyon (mécanique, énergétique, génie civil, acoustique) - ED 162

Financement de la thèse : IRSN, EDF & Framatome

L'IRSN, dans le cadre de la sureté des centrales nucléaires, étudie différents scénarios accidentels hypothétiques. Cette thèse s'intègre dans l'étude des Accidents de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Les APRP résultent de l'apparition d'une brèche sur le circuit primaire d'un réacteur à eau pressurisée (REP) et conditionnent le dimensionnement des dispositifs de secours. Lors d'un transitoire APRP le circuit primaire se dépressurise (Voir figure), les crayons combustibles sont exposés à de la vapeur d'eau à haute température (pouvant atteindre 1200°C) et peuvent éclater sous la pression des gaz dans le crayon. La vapeur pénètre alors par l'ouverture, induisant une oxydation interne au voisinage de l'éclatement associée à un relâchement d'hydrogène. Consécutivement, cet hydrogène gazeux s'accumule progressivement dans l'espace exigu compris entre la gaine et le combustible jusqu'à quelques dizaines de millimètres de l'éclatement. Une prise massive d'hydrogène peut alors survenir en surface interne de la gaine et conduire à un pic localisé de concentration en hydrogène.

Des essais dits semi-intégraux ont été mis en place dans l'industrie nucléaire afin d'étudier ce phénomène ainsi que le comportement des gaines en conditions APRP. La nature des essais, ainsi que la difficulté de maitrise des différents paramètres liés à ces essais complexifient l'analyse fine du phénomène d'hydruration secondaire.

Ces travaux de thèse, visent donc dans un premier temps, à mettre en place des essais analytiques afin d'étudier l'influence de divers paramètres sur l'hydruration secondaire. Pour améliorer la compréhension des phénomènes contrôlant l'hydruration secondaire, des caractérisations innovantes ont été mises en œuvre. Des méthodes de caractérisation macroscopiques et de micro-analyses (microsonde de Castaing, micro-LIBS, SIMS) ont déjà été utilisées. Des essais mécaniques seront mis en place pour la caractérisation de la fragilisation à l'hydrogène des gaines. Un volet modélisation est également développé en parallèle des essais dans le logiciel SHOWBIZ.

Les premiers résultats des essais analytiques, mettent en évidence une croissance du pic d'hydrogène avec le temps d'oxydation jusqu'à saturation. L'effet du gap (distance entre les pastilles et la surface interne de la gaine), ainsi que l'effet protecteur d'une couche de corrosion préexistante vis-à-vis de l'hydruration secondaire ont également été mis en évidence.

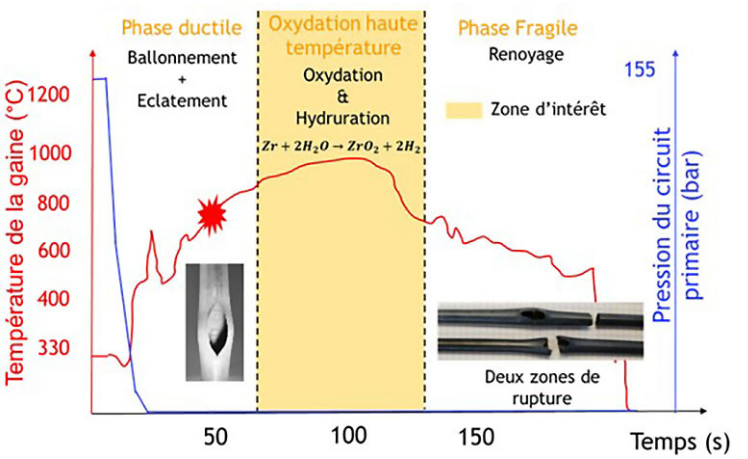


Illustration des différentes étapes d'un transitoire typique d'un APRP.

Mots clés : APRP, hydruration secondaire, alliage de Zirconium, fragilisation hydrogène.

SUJET DE LA THÈSE

Étude théorique de la microstructure et du comportement des produits de fission dans le combustible d'oxyde d'uranium dopé à l'oxyde de chrome

Doctorant :	Théo ROUBILLE
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SAM / LETR
Référent IRSN de la thèse :	Roland DUCHER
Direction de thèse :	Yves PIPON / Institut de Physique Nucléaire de Lyon
École doctorale :	Lyon COMUE - Physique et astrophysique de Lyon (PHAST) - ED 52
Financement de la thèse :	IRSN & Framatome

Les combustibles dits ATF (*Accident Tolerant Fuels*) sont conçus pour avoir un meilleur comportement en conditions accidentelles, par exemple, lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), tout en conservant de bonnes caractéristiques dans les conditions normales d'exploitation. Framatome développe un concept ATF basé sur le dopage à l'oxyde de chrome de dioxyde d'uranium (UO_2) et il constitue le matériau d'étude de la thèse.

L'objectif est d'examiner l'impact du chrome sur les mécanismes de diffusion de deux produits de fission césium et molybdène connus pour leur influence sur la chimie du combustible et le transport de l'iode dans le circuit primaire en conditions accidentelles. Les études sont réalisées à l'échelle atomique par dynamique moléculaire avec le code LAMMPS et requièrent l'optimisation de potentiels interatomiques pour décrire le comportement de l'UO_2 dopé chrome. Une nouvelle implémentation du potentiel SMTB-Q, appelée SMTB-QB, a été utilisée pour décrire la liaison chimique des matériaux iono-covalents. Cette version permet désormais d'évaluer le gap électronique, de traiter des matériaux multi-cations et de traiter rigoureusement la non-stœchiométrie. Ainsi, le potentiel SMTB-QB rend possible la substitution d'atomes d'uranium par du molybdène, du césium et du chrome et l'étude de la diffusion de ces atomes et en particulier du mécanisme lacunaire dominant dans les processus de diffusion de ces éléments dans l'UO_2.

Nous avons d'abord vérifié que le potentiel SMTB-QB permettait de reproduire les propriétés de l'UO_2 non dopé, notamment les constantes élastiques, le gap d'énergie dans la structure de bandes, et le comportement des défauts chargés, ce qui constitue une nouveauté pour un potentiel de nature semi-empirique.

Puis, nous nous sommes intéressés au développement d'une paramétrisation du potentiel SMTB-QB pour modéliser les interactions entre le chrome et l'oxygène dans l'oxyde de chrome. Grâce à la transférabilité du potentiel SMTB-QB, cette paramétrisation nous permettra d'étudier la liaison chrome-oxygène dans l'UO_2 dopé chrome.

Grâce à ce travail et aux paramétrisations déjà disponibles pour les liaisons molybdène-oxygène et césium-oxygène, nous pourrons étudier les mécanismes de diffusion du Cs et du Mo dans l'$UO_{2\pm x}$ dopé au chrome, et les comparer au combustible $UO_{2\pm x}$ non-dopé afin d'établir l'impact du chrome. *In fine*, la détermination des coefficients de diffusion du césium et du molybdène dans l'UO_2 dopés chrome permettront d'enrichir le code de relâchement de l'IRSN (MFPR-F) et de préparer à l'évaluation de sûreté de ces futurs combustibles.

Mots clés : LAMMPS, ATF, dynamique moléculaire, UO_2 dopé chrome, SMTB QB.

SUJET DE LA THÈSE

Analyse thermodynamique des interactions chimiques aux hautes températures des ATF (*Accident Tolerant Fuel*)

Doctorant :	Jinjiang CUI
Date du début de la thèse :	09 / 11 / 2020
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SAM / LETR
Référent IRSN de la thèse :	Marc BARRACHIN
Direction de thèse :	Olivier TOUGAIT / Université de Lille
École doctorale :	Lille - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement (SMRE) - ED 104
Financement de la thèse :	IRSN

The Ph.D. project regards the thermochemical behaviors of Accident tolerant Fuels (ATFs), which are further targeted to enhance the safety, competitiveness, and economics of nuclear power. The considered concepts regard chromium-coated zirconium-based alloys and chromium oxide doped UO_2 fuel pellets which would benefit the improvement of corrosion resistance in steam and enhanced retention of fission products, respectively. The Ph.D. work aims to study the phase relations, thermodynamic properties, and assessment of Zr-Cr-O and U-Cr-O ternary systems by an approach coupling experiment and modeling.

The doubt points in the Zr-Cr binary system have been cleared. First, the composition and eutectic temperature which is a key to describe the degradation of the Cr-coated cladding in severe accident conditions has been determined. The thermodynamic properties of the $ZrCr_2$ Laves phases, for both C14 and C15 polytypes, were also measured. A reassessed phase diagram was worked out using the CALPHAD technique and will be integrated into the NUCLEA database. This would be the first Zr-Cr phase diagram modeling supported by the experimentally measured enthalpy of formation and specific heat capacity for $ZrCr_2$ compound. In the meantime, investigations on Zr-Cr-O ternary system yield pure samples of Zr_3Cr_3O which is the only intermediate phase. Its specific heat capacity was measured in a wide temperature interval (1.8K to 1063K) which was fitted with a modified Einstein equation. Its enthalpy of formation was also determined by drop solution calorimetry at 1173K. Its crystal structure was refined by XRD analysis using Rietveld method. Ab-initio DFT calculations yield the enthalpy of formation of Zr_3Cr_3O at 0K. Combining this result and heat capacity modeling, the enthalpy of formation at room temperature was theoretically calculated showing a good agreement with the experimental value.

A phase relation investigation was realized for the U-Cr binary system regarding the solubility of chromium into the stable allotropic forms of uranium. Preliminary synthesis for representative compositions in the U-Cr-O ternary system was initiated and homogenized at 1273K. More experiments are currently under progress for heat-treated samples at 1473K and 1773K. Based on a literature review, a method was successfully applied to prepare UCrO4 phase with purity >95% at. which is suitable for the measurement of the thermal variation of the specific heat at low temperatures (1.8K to 293.15K) using relaxation calorimetry. Two publications are under writing and are expected to be submitted in 2023.

Mots clés : ATF (Accident tolerant fuel).

SESSION POSTERS

Salle Frédéric Mistral

Mercredi 29 mars 13 h 30 - 14 h 30
Jeudi 30 mars 13 h 30 - 14 h 30

Doctorants de 1re année
PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

UNITÉ DE RECHERCHE EN ENVIRONNEMENT

Occitane BARBAUX - Températures maximales en France au 21ème siècle.

Margot CREVET - Évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles (*Apis mellifera*), de la molécule à la population.

Léa DASQUE - Étude des effets de la radiocontamination de l'environnement sur l'écophysiologie d'un amphibien, la rainette arboricole.

Etienne DUREUIL - Caractérisation du mélange des écoulements à densité variable.

Kayani GANESHALINGAM - Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz dans les argilites.

François GUILLORY - Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants : continuum sol-rivière.

Maiwenn HUMBEZI DESFEUX - Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux.

Lisa MAMMARELLA - Fault Displacement Hazard on Principal Fault rupture: probability of occurrence, slip distribution and role of surface geology.

Meryem MEZIANE - Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés grâce à la géostatistique non-stationnaire.

SUJET DE LA THÈSE

Températures maximales en France au 21ème siècle

Doctorante :	Occitane BARBAUX
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BEHRIG
Référent IRSN de la thèse :	Nathalie BERTRAND
Direction de thèse :	Philippe NAVEAU / CNRS & Aurélien RIBES / Météo France
École doctorale :	Sorbonne univ. - Sciences de l'environnement d'Île-de-France - ED 129
Financement de la thèse :	IRSN & Météo France

La thèse, qui s'inscrit dans le cadre du traitement de la question *« Comment mieux caractériser et modéliser les contraintes générées sur l'installation par des sollicitations ou agressions internes et externes (y compris naturelles) et qui pourraient impacter la sûreté ? »* et qui se rattache à l'enjeu *« Définir des stratégies pour l'évaluation statistique des aléas hydrométéorologiques extrêmes »* de la stratégie scientifique de l'IRSN, vise à quantifier le risque de dépassement de niveaux élevés de température, à l'échelle d'un site d'intérêt et à l'horizon 2100.

Dans un contexte normal, la caractérisation de cet aléa repose généralement sur une approche probabiliste. Les méthodes utilisées sont généralement adaptées au cadre non-stationnaire, donc sans changement climatique. Dans ce cas, la quantité d'intérêt est le niveau de retour, qui est équivalent à une température dont la probabilité annuelle de dépassement est fixée (par exemple 50 ans).

Pour prendre en compte la non-stationnarité provoquée par le changement climatique, il est nécessaire de définir une quantité d'intérêt adaptée à la définition d'un niveau de sûreté représentatif de toute une période.

De plus, il est nécessaire de prendre en compte l'incertitude liée à l'évolution du climat futur. La piste choisie pour cette thèse est l'intégration de l'information fournie par les modèles de climat. Ces modèles reposent sur une base physique et fournissent donc une source d'information indépendante des observations locales. Cette solution permet aussi d'estimer l'évolution de la température conditionnellement à un scénario d'émissions futures.

Enfin, la quantité d'intérêt est caractérisée par sa faible probabilité, nécessitant l'utilisation de distributions « GEV » tirées de la statistique des valeurs extrêmes.

La méthode statistique d'estimation (Ribes 2020) choisie repose sur une construction bayésienne pour intégrer l'information des modèles climatiques sous forme d'une a-priori, qui est ensuite contraint par des observations.

Une première application consiste donc à appliquer cette méthode sur les trajectoires fournies par les modèles climatiques globaux en contraignant par les observations de stations météorologiques de bonne qualité. Il est aussi envisagé d'intégrer les données sur site, de qualité plus dégradée.

Cette première application permettra d'illustrer les difficultés liées à l'application locale d'une méthode reposant sur des outils créés pour l'échelle globale. Il sera ensuite utile d'explorer des méthodes permettant de mieux modéliser la composante locale, ou d'appliquer une correction des biais sur les données. Il est aussi prévu d'explorer des alternatives statistiques pour l'estimation des intervalles de confiance et la construction de l'a-priori.

Mots clés : statistiques, théorie des valeurs extremes, changement climatique, modèles de climat, observations.

SUJET DE LA THÈSE

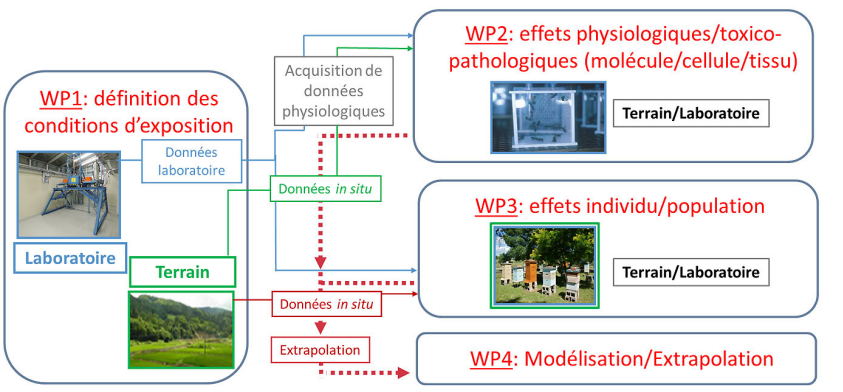
Évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles (*Apis mellifera*), de la molécule à la population

Doctorante :	Margot CREVET
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LECO
Référent IRSN de la thèse :	Béatrice GAGNAIRE
Direction de thèse :	Luc BELZUNCES / INRAE Avignon, UR Abeilles & Environnement
École doctorale :	AMU - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	ANR BEERAD

La radiocontamination de l'environnement est un enjeu écologique majeur. Afin, d'avoir une meilleure anticipation des conséquences d'accidents tels que Tchernobyl ou Fukushima, il est nécessaire d'améliorer les connaissances sur les impacts et les risques environnementaux de l'irradiation et de la contamination liées aux éléments radioactifs. Dans le contexte de ma thèse, l'abeille domestique, Apis mellifera, a été choisie comme modèle pour étudier les effets des rayonnements ionisants aux niveaux moléculaire, cellulaire et tissulaire, mais également aux niveaux de l'individu et de la population. L'abeille, rendant de nombreux services aux écosystèmes, est essentielle pour l'environnement et la société. En effet, les abeilles sont des insectes d'importance économique, agro-environnementale, sociétale et scientifique. L'objectif de ma thèse est d'approfondir la connaissance des effets et des mécanismes d'action des rayonnements ionisants sur les abeilles, puisque très peu de données existent sur ce sujet. Ma thèse s'inscrit dans la Question prioritaire n°1 de la Stratégie Scientifique de l'IRSN « Quels sont les effets d'une exposition à de faibles doses ? ». Elle fait partie du projet ANR BEERAD piloté par le LECO et l'INRAE d'Avignon.

Ma thèse sera basée sur deux approches, terrain et laboratoire, menées en parallèle. La partie terrain est développée par le suivi de plusieurs ruches placées sur des sites présentant un gradient de contamination autour de la centrale nucléaire de Fukushima pendant 2 ans. La partie laboratoire est amenée en réalisant des irradiations externes des abeilles lors d'expériences en conditions contrôlées. Une estimation des débits de doses totales absorbées par les abeilles sera établie, via les valeurs de débit de dose externes (micro-dosimètres posés directement sur les abeilles) additionnées aux valeurs de débits de doses internes (WP1). Une grande partie de ma thèse se concentre sur l'évaluation des effets physiologiques (molécule, cellule, tissu) induits par les rayonnements ionisants sur les abeilles, ainsi que les effets toxicopathologiques (WP2). Les effets au niveau de l'individu et de la population (longévité, comportement, reproduction/développement, performances cognitives) seront également décrits (WP3). Une partie modélisation est également envisagée, afin de pouvoir détecter des effets précoces qui pourront par la suite causer des événements défavorables pour la colonie (WP4).

Mots clés :
rayonnements ionisants, abeilles, physiologie, approche combinée terrain-laboratoire.



Structure du projet

SUJET DE LA THÈSE

Étude des effets de la radiocontamination de l'environnement sur l'écophysiologie d'un amphibien, la rainette arboricole

Doctorante : Léa DASQUE

Date du début de la thèse : 16 / 11 / 2022

Laboratoire IRSN : PSE-ENV / SRTE / LECO

Référent IRSN de la thèse : Sandrine FRELON & Jean-Marc BONZOM

Direction de thèse : Nathalie MONDY / Université Lyon I

École doctorale : Lyon COMUE - Évolution, écosystèmes, microbiologie, modélisation (E2M2) - ED 341

Financement de la thèse : IRSN

Les accidents nucléaires majeurs, tels que Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011), ont entrainé d'importants rejets radioactifs dans l'environnement, ce qui engendre une exposition chronique de la faune présente sur ces territoires. Cependant, de nombreuses incertitudes persistent sur les effets à long terme de cette contamination sur la biodiversité. A l'IRSN, un projet a débuté sur cette problématique dans les régions précitées, avec l'étude de rainettes arboricoles, organisme sentinelle. Le doctorat de C. Car (LECO) a notamment permis de montrer que 30 ans après l'accident nucléaire de Tchernobyl les rainettes (*Hyla orientalis*) vivant dans les zones contaminées, avaient des populations de faible effectif et présentaient un très fort taux de mutations mitochondriales ainsi qu'une signature transcriptomique montrant une altération du métabolisme énergétique (dont la fonction mitochondriale). Ces résultats suggèrent un état corporel dégradé des individus dont la démonstration doit être faite. Ainsi le double objectif de cette thèse est 1) de vérifier si ces résultats sont généralisables à d'autres environnements contaminés en travaillant dans la préfecture de Fukushima sur l'état physiologique d'une rainette, *Dryophytes japonicus* et 2) d'obtenir une validation physiologique et fonctionnelle de ces différences observées au niveau génétique et d'en mesurer les conséquences écologiques sur l'organisme.

Pour cela, nous allons tout d'abord étudier l'impact de la radio-contamination sur le métabolisme énergétique avec une approche enzymatique (enzyme de la glycolyse et du cycle de Krebs), puis à l'aide de respiromètres à haute résolution pour étudier l'activité respiratoire mitochondriale. La bioénergétique étant très liée aux capacités immunitaires des animaux, dans un second temps, nous mesurerons le potentiel immunitaire des rainettes en caractérisant des composantes innées et acquises de l'immunité des individus (formule leucocytaire, test PHA...). Enfin, nous regarderons les conséquences écologiques de l'état physiologique des animaux sur le comportement locomoteur et la production de signaux sexuels secondaires des rainettes (comme le chant) qui leur sont très couteux en terme d'énergie. L'ensemble de ces paramètres individuels seront mis en relation avec la dose de radioactivité absorbée par chacun des individus. Ainsi nous pourrons mieux comprendre les effets à long terme de l'exposition à la radioactivité sur la santé des organismes en déterminant si l'exposition aux rayonnements ionisants entraîne une réduction de l'efficacité du métabolisme énergétique et perturbe le système immunitaire, et ainsi appréhender le devenir des populations.

Mots clés : métabolisme énergétique, système immunitaire, rainette, Fukushima.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation du mélange des écoulements à densité variable

Doctorant :	Etienne DUREUIL
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Patrick BOYER
Direction de thèse :	Emmanuel MIGNOT / École centrale de Lyon
École doctorale :	MEGA de Lyon (Mécanique, Énergetique, Génie Civil, Acoustique) - ED 162
Financement de la thèse :	IRSN & INRAE

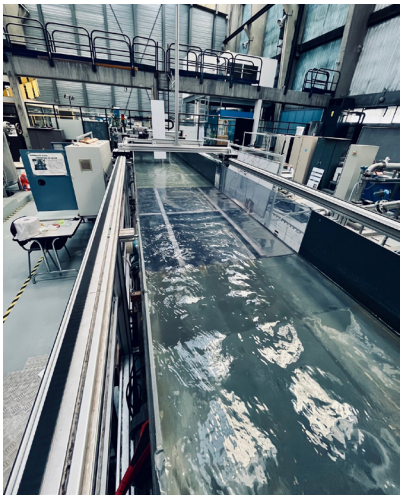
Ce sujet s'inscrit dans la question 2 des questions scientifiques de l'IRSN relatives à la radioprotection. Il traite du mélange de deux écoulements à surface libre, et à densité variable en raison d'écarts de température, de turbidité ou de salinité. Nous nous intéressons aux confluences des rivières, et au mélange des effluents à l'aval des canaux de rejets des CNPE.

Ces processus impactent le mélange à l'aval des émissaires de rejets et des confluences, ainsi que le fractionnement liquide-solide et l'échange de polluants entre la colonne d'eau et les sédiments.

Bon nombre de descriptions des écoulements aux confluences, tant par des expériences en laboratoire, que par des mesures de terrain, caractérisent l'effet des paramètres de la confluence sur l'hydrodynamique mais peu de travaux traitent des processus et de l'efficacité du mélange des eaux. Actuellement il est difficile de prédire le mélange en aval d'une confluence selon les conditions hydrologiques. Cette problématique nécessite de comprendre le poids du cisaillement (latéral) et des effets de densité (stratification) sur le mélange. Dans un cadre opérationnel, comprendre ces mécanismes est intéressant pour quantifier les impacts sur l'écologie, et sur les usages de l'eau. L'étude est faite en collaboration entre l'IRSN, INRAE, et le LMFA.

Les objectifs scientifiques sont :

1) Comprendre comment l'hydrodynamique et le mélange sont affectés par les effets de densité, pour différentes valeurs de hauteur d'eau et vitesse.
2) Déterminer un paramètre numérique adapté aux confluences et permettant d'établir à une échelle macroscopique le poids relatif sur le mélange du cisaillement et des effets de densité.
3) Prédire le coefficient de mélange latéral et la distance de bon mélange en adaptant les formulations de type Fisher à partir du champ de vitesse 3D calculés/mesurés en intégrant les effets de densité.



Canal hydraulique du LMFA

Le projet comportera :

Des expériences sur un canal hydraulique permettant de contrôler la différence de densité par ajout de sel et de suivre la conductivité par 4 sondes. Un refroidissement sans impact significatif sur la densité, par ajout de glace dans l'un des deux écoulements permettra de créer un gradient de température pour visualiser le mélange grâce à une caméra thermique.

Des mesures de terrain aux confluences et à l'aval des rejets d'eaux chaudes des CNPE, à l'aide de sondes CTD, et d'un aDcp embarqués sur un bateau qui effectue des traversées des deux affluents amont et de la rivière en aval de la confluence avec positionnement DGPS.

Mots clés : Hydraulique, mélange, rivière, CNPE, aDcp, densité, conductivité, confluences.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz dans les argilites

Doctorante :	Kayani GANESHALINGAM
Date du début de la thèse :	21 / 11 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Magdalena DYMITROWSKA
Direction de thèse :	Djimédo KONDO / Sorbonne Université
École doctorale :	Sorbonne univ. - Sciences Mécanique, Acoustique, Électronique et Robotique de Paris (SMAER) - ED 391
Financement de la thèse :	IRSN & EURAD

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des travaux menés par l'IRSN sur le stockage géologique profond des déchets radioactifs dans une couche d'argilites du Callovo-Oxfordien (projet Cigéo). Une importante production d'hydrogène étant attendue après la fermeture du stockage, la migration de la phase gazeuse pourrait modifier les propriétés de matériaux des barrières et donc impacter le transport des radionucléides. Plusieurs projets expérimentaux et numériques ont été entrepris au sein de l'IRSN sur la migration de gaz dans le stockage.

Des études expérimentales montrent l'existence d'un couplage hydromécanique entre les écoulements eau-gaz dans les pores et la déformation du squelette solide des matériaux argileux. Ces écoulements font l'objet de recherche expérimentales dans le cadre du programme européen EURAD auquel l'IRSN participe. Cependant, devant l'impossibilité de valider les résultats de ces modèles par des expériences réalisables à des échelles d'espace (plusieurs km) et de temps (plus de 100 000 ans) représentatives de celles d'un stockage, les approches numériques multi-échelles apparaissent comme un moyen indispensable pour justifier les modèles. Pour cela, l'IRSN a développé une approche basée sur la méthode SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de gaz à l'échelle des pores et pour pouvoir évaluer la pertinence de lois de comportement homogénéisées utilisées dans des simulations numériques plus macroscopiques.

Ainsi, en s'appuyant sur le code utilisant la méthode SPH, la première partie du travail de la thèse consistera à améliorer la scalabilité (capacité à s'adapter à un changement d'échelle) des simulations. Des maquettes numériques 3D seront préparées à partir des données d'imagerie 3D de plusieurs argilites, acquises dans le cadre du programme EURAD. Ces maquettes 3D seront utilisées pour effectuer des simulations de migration de gaz (drainage) dans une gamme des contraintes et de pressions de gaz la plus représentative possible pour les conditions expérimentales mises en place chez les différents partenaires d'EURAD. Guidée par les réponses/comportements effectifs, on élaborera un modèle hydromécanique continu qui pourrait être utilisé pour décrire la migration de gaz à des échelles supérieures (centi- et métriques).

Mots clés : écoulements dilatants, changement d'échelle, *smooth particles hydrodynamics*.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation des transferts de radionucléides à l'échelle des bassins versants : continuum sol-rivière

Doctorant :	François GUILLORY
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SRTE / LRTA
Référent IRSN de la thèse :	Hugo LEPAGE
Direction de thèse :	Hugo LEPAGE / IRSN & Sabine SAUVAGE / CNRS
École doctorale :	AMU - Sciences de l'environnement - ED 251
Financement de la thèse :	IRSN

La modélisation du devenir des radionucléides dans l'environnement est une étape nécessaire pour anticiper les risques sanitaires et environnementaux que la radioactivité peut engendrer. Il s'agit de l'une des missions fondamentales de l'IRSN qui s'attache à y répondre depuis de nombreuses années. Il convient de modéliser le transfert des radionucléides, émis naturellement ou accidentellement, dans et au travers des compartiments de l'environnement : atmosphérique, terrestre, fluvial et marin. S'il existe de nombreux modèles à l'IRSN pour évaluer le transfert des radionucléides au sein de ces compartiments, c'est plus généralement l'interface entre eux qui est moins bien représentée. Pourtant ces interfaces sont associées à des processus de transfert liés à leur connectivité et à des processus d'adsorption/désorption qui influencent le devenir et la spéciation de ces radionucléides. Cette thèse s'intéressera spécifiquement à l'interface des compartiments terrestre et fluvial encore mal connue et mal quantifiée au niveau des échanges. Le transfert des radionucléides des sols d'un bassin versant aux cours d'eau adjacents dépend de plusieurs paramètres (érosivité et connectivité des sols, pente topographique, distribution des activités dans les sols...) qu'il faut prendre en compte afin de pouvoir modéliser les flux susceptibles d'être transférés ou stockés.

Les travaux de cette thèse s'appuieront sur un modèle agro-hydrologique (SWAT) déjà utilisé pour modéliser les transferts de sols, sédiments et de certains polluants (nutriments, pesticides) dans les bassins versants. Il conviendra au cours de cette thèse de développer un module spécifique à la radioactivité (en particulier le ^{137}Cs) en se basant sur les nombreuses connaissances acquises par l'IRSN au cours des dernières décennies (transfert sol plante, transfert forestier, coefficient de distribution...) et la littérature scientifique (études sur site à Tchernobyl et Fukushima, ou en laboratoire). Pour cela, les premiers travaux de cette thèse porteront sur la prise en main du modèle sur un affluent du Rhône (Ardèche) à l'aide d'une équipe de chercheurs de Toulouse spécialistes de SWAT. Le modèle bénéficiera des travaux portés dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône pour le calibrer et le valider sur les composantes hydriques (débit) et sédimentaires et pour développer le module sur la radioactivité. Après validation du module sur l'Ardèche, le modèle pourra être appliqué aux bassins versants du Rhône et de Fukushima dont les bases de données sont déjà existantes.

Mots clés : modélisation opérationnelle, événements climatiques extrêmes, scénario post-accidentel.

SUJET DE LA THÈSE

Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux

Doctorante :	Maiwenn HUMBEZI DESFEUX
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SEDRE / LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Jean-Michel MATRAY
Direction de thèse :	Manuel MARCOUX / Université Paul Sabatier - Toulouse
École doctorale :	Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & AFCN

La thèse s'inscrit dans le cadre des recherches menées par l'IRSN sur le stockage géologique des déchets et plus particulièrement sur les interactions entre les colis de stockage et la barrière géologique. L'étude doit notamment aboutir à évaluer la contribution de la thermodiffusion (effet Soret) au transfert des radionucléides et des gaz en cas de relâchement prématuré lors du transitoire thermique lié à la présence de colis exothermiques de haute activité.

Ce transitoire est censé modifier la température de la roche au contact des colis jusqu'à 80°C pendant quelques milliers d'années. Il est aussi censé accélérer le flux diffusif total de radionucléides (solvant, solutés et gaz) par couplage des flux diffusif sous gradient de concentration (Loi de Fick) au flux diffusif sous gradient de température (effet Soret). Ainsi l'objectif de la thèse sera de déterminer les paramètres utiles à la résolution de l'équation de flux total : comme les coefficients de diffusion effectifs (De) et de Soret (ST), la concentration en traceur (Ci) de l'espèce diffusante en fonction de la distance (x) et température (T).

Une partie de la thèse concerne la mise en place d'une expérience *in situ* menée au laboratoire souterrain de Tournemire (LRST). Cette expérience doit aboutir à créer un échange avec et sans gradient de température entre une eau marquée en ^{2}H, Cl^{-}, Br^{-} et I^{-}, comme analogues des radionucléides (^{3}H, $^{36}Cl^{-}$, $^{129}I^{-}$) et l'eau porale de l'argilite. Les différentes phases du travail vont consister à : 1) mettre en place l'expérience *in situ* DIGIT au démarrage de la thèse (réalisation de forage carottés et instrumentés de capteurs), 2) acquérir les paramètres initiaux (teneurs en traceurs et coefficients de diffusion effectifs) dans l'eau porale, 3) suivre l'essai après mise en eau sans échange thermique (15°C) ou avec échange (80°C) par des prélèvements réguliers de carottes et fluides sur une période de 2 ans et analyses aux laboratoires Lutèce (IRSN) et GEOPS (Univ. Paris Saclay).

L'autre partie sera menée en parallèle au laboratoire de l'IMFT. Le dispositif expérimental permettra de suivre le transfert de matière d'un mélange de gaz binaire neutre (Helium-Azote) à travers un échantillon poreux centimétrique soumis à un gradient de température contrôlé.

Dans les deux cas la comparaison des données expérimentales aux données théoriques devraient aboutir à l'obtention des coefficients de Soret pour les différents traceurs et permettre ainsi d'évaluer contribution de la thermodiffusion au transfert de matière par diffusion.

Mots clés : thermodiffusion, diffusion, radionucléides, gaz, stockage géologique.

SUJET DE LA THÈSE

Fault Displacement Hazard on Principal Fault rupture: probability of occurrence, slip distribution and role of surface geology

Doctorante :	Lisa MAMMARELLA
Date du début de la thèse :	01 / 11 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SCAN / BERSSIN
Référent IRSN de la thèse :	Stéphane BAIZE
Direction de thèse :	Paolo BONCIO / Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara
École doctorale :	Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara
Financement de la thèse :	IRSN & INGV

Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) estimates the probability of occurrence and displacement exceedance of surface rupture during an earthquake. The methodology was directly inspired by Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) and pioneered by Youngs *et al.* (2003, Earthq. Spectra).

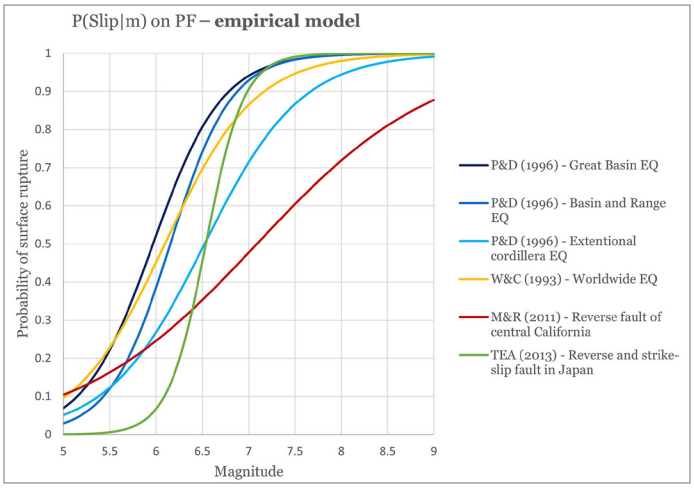
PFDHA explores the probabilities related to principal and secondary/distributed ruptures, either in terms of occurrence or displacement exceedance. During a former PhD thesis by U. Chieti and IRSN (F. Nurminen), empirical regressions were improved for secondary ruptures related to dip-slip earthquakes. However, several aspects still need to be improved to provide a complete updated methodology. My thesis will be divided into 3 Worck-Packages (WP), which will set the tempo of my thesis, focusing on two critical themes:

- WP1 – probability of surface rupture on the principal fault (i.e. the source of the seismic energy);
- WP2 – control of near-surface geology: the role of lithology and structural geology on principal and distributed (i.e. secondary) surface rupturing;
- WP3 – PFDHA code implementation (for dip-slip EQ).

Compared to PSHA equation, PFDHA replaced the ground motion attenuation function with a fault displacement attenuation function, which include a "probability of occurrence of surface rupture" term. Few association studies are available in literature at present, and each one derives the probability from empirical models, and especially based on logistic regression applied to data set.

Although the empirical approach informs us on the conditional probability of surface rupture in a given tectonic environment or given a certain style of faulting (Figure1), it suffers from major pitfalls, such as completeness of the data set, data bias, homogenization of different fault geometries and settings, tectonic environment with blind and/or buried fault. We then decided to develop another method, that we call the analytical approach and will look at the thickness and the dip of the fault that we want to model. To do that we will use magnitude related scaling-relations, including an aspect ratio model, a nucleation depth distribution and rupture propagation rules. This model then could be applied to different settings where those parameters could be inferred from independent data (earthquake catalogues, fault maps and information at depth).

Mots clés : Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis, dip slip EQ, principal fault, near surface geology, numerical model.



Conditional probability of surface rupture on Principal Fault using the empirical approach, according to current literature. The colored lines represent the results obtained from the logistic regressions applied to the databases listed in the figure. P&D (Pezzopane and Dawson), W&C (Wells and Coppersmith), M&R (Moss and Ross), TEA (Takao et al.).

SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une démarche opérationnelle d'exploitation de la mesure radiologique *in situ* : mieux caractériser les sites contaminés grâce à la géostatistique non-stationnaire

Doctorante : Meryem MEZIANE

Date du début de la thèse : 17 / 10 / 2022

Laboratoire IRSN : PSE-ENV / SEDRE / LELI

Référent IRSN de la thèse : Mathieu LE COZ

Direction de thèse : Chantal DE FOUQUET / École des Mines de Paris

École doctorale : Sorbonne université - Géosciences, ressources naturelles et environnement - ED 398

Financement de la thèse : IRSN

La reconnaissance puis la caractérisation des territoires contaminés par des radionucléides sont des étapes cruciales de la gestion des conséquences environnementales potentielles des activités nucléaires. En particulier, la cartographie des niveaux d'activité des sols constitue un support décisionnel (i) en situation post-accidentelle, pour la délimitation des zones d'exclusion et la définition des stratégies de reconquête éventuelles ; ou (ii) dans le cadre de la réhabilitation d'anciens sites industriels ou miniers pollués, pour l'évaluation des solutions d'assainissement des sols pollués et la quantification des volumes de déchets. Cette cartographie repose principalement sur l'interprétation des mesures in situ réalisées par différents porteurs (piéton, voiture, hélicoptère), chacun associé à une fréquence d'acquisition et à un champ de vision spécifiques. Les mesures *in situ* peuvent être complétées par des mesures en laboratoire sur des échantillons prélevés dans l'environnement. La qualité de la cartographie dépend notamment de l'estimation spatiale, qui permet de convertir les mesures ponctuelles de nature hétérogène en une information spatialisée homogène estimée (Masoudi *et al.*, 2019). L'enjeu du projet est d'établir des méthodes d'estimation applicables dans des contextes opérationnels et qui permettent de combiner des mesures correspondant à des supports et échelles variés.

Les méthodes d'estimation usuelles sont le plus souvent basées sur l'hypothèse de la stationnarité spatiale de la variable d'intérêt. Cependant, les propriétés décrivant les structures spatiales des niveaux d'activité à l'échelle d'un territoire contaminé ainsi que les liens entre les différents types de mesures de ces activités varient en fonction de l'espace. En effet, celles-ci sont influencées notamment par les conditions d'acquisition des mesures, les conditions de dépôt des radionucléides et les particularités géographiques locales (topographie et occupation des sols en particulier). Au cours de la thèse, l'approche proposée consistera à quantifier les liens entre les niveaux d'activité mesurés et ces variables auxiliaires ; puis de les introduire dans des méthodes de géostatistique non-stationnaire telles que la dérive externe, les variogrammes numériques (Pannecoucke, 2020), le co-krigeage ou l'approche SPDE. Dans un premier temps, les données issues de différentes campagnes de mesures effectuées à la suite de l'accident de Fukushima seront utilisées. Dans un deuxième temps, la méthodologie sera appliquée à la caractérisation de contaminations à l'aval d'un ancien site minier uranifère français.

Mots clés : spectrométrie gamma *in situ*, non-stationnarité spatiale, géostatistique, réduction d'incertitude.

Salle Frédéric Mistral

Mercredi 29 mars 13 h 30 - 14 h 30
Jeudi 30 mars 13 h 30 - 14 h 30

Doctorants de 1re année
PÔLE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

UNITÉ DE RECHERCHE EN SANTÉ

Sarmini BAVANANTHAN - Réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire lors d'une irradiation pulmonaire en conditions stéréotaxiques : Focus sur les cellules club.

Laurie DE CASTRO - Étude des effets potentiellement cancérigènes de l'uranium au niveau rénal à l'aide de modèles murins génétiquement modifiés (UKCAN).

Mélissandre GOMOT - Irradiations Médicales à Faible Dose et Carcinogenèse du Côlon.

Elen GOUJON - Identification de marqueurs moléculaires de la radiation à faibles doses à partir de données multi-omiques.

Yanis HAZEM - Phénomènes de haute énergie dans les systèmes orageux et étude dosimétrique.

Sylvie HENYOH AFI MAWULAWOE - Relations entre l'exposition résidentielle au radon au début de la vie et les effets sur la santé à l'âge adulte, au sein de la cohorte CONSTANCES.

Claire LAGO - Réponse de l'endothélium vasculaire à l'irradiation in vivo : intérêt pour la prédiction du risque de toxicité après radiothérapie.

Sabine LAM - Étude de la complexation des ions lanthanides avec les acides hydroxamiques pour des applications en médecine nucléaire.

Claire LÉONHART - Détecteurs Diamant ultra-Minces pour le Monitorage en ligne de MicroFaisceaux d'Ions - DéFI-DiaMs.

Alexandre PIGNARD - Optimisation de la radiothérapie interne vectorisée avec le 177Lu-PSMA-617 pour le cancer métastatique de la prostate résistant à la castration : quelle méthode pour une estimation personnalisée de la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque ?

Anne-laure POULIET - Thérapie cellulaire par les cellules souches mésenchymateuses (CSM) des atteintes tissulaires de la vessie après radiothérapie.

Diane QUEVAUVILLERS - Caractérisation et utilisation des scintillateurs stilbène pour la métrologie et la spectrométrie des neutrons entre 100 keV et 22 MeV sur AMANDE et CEZANE.

Théo SILVESTRE - Modélisation spatio-temporelle et outils d'IA pour l'analyse dose-réponse et la prédiction de lésions cérébrales et de troubles cognitifs radio-induits chez des patients traités par radiothérapie pour un glioblastome.

Arthur THOMAS-JOYEUX - La réponse aux dommages de l'ADN dans le maintien de la stabilité myotubulaire après exposition aux rayonnements ionisants.

SUJET DE LA THÈSE

Réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire lors d'une irradiation pulmonaire en conditions stéréotaxiques : Focus sur les cellules club

Doctorante :	Sarmini BAVANANTHAN
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Agnès FRANCOIS
Direction de thèse :	Agnès FRANCOIS / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Cancérologie, biologie, médecine, santé - ED 582
Financement de la thèse :	IRSN

Aujourd'hui, plus de la moitié des patients atteints de cancer vont bénéficier au cours de leur prise en charge d'un traitement par radiothérapie. L'irradiation des tissus sains présents dans le champ d'irradiation peut conduire au développement d'effets secondaires pouvant compromettre la qualité de vie des patients. Les programmes de recherche de l'IRSN s'articulent autour de grandes questions dont l'une est comment mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la réponse des tissus sains exposés aux rayonnements ionisants fait donc partie des missions du Laboratoire de Radiobiologie des Expositions Médicales (LRMed) au sein duquel se déroule ce projet de thèse. Afin de mener à bien ses missions, le LRMed doit s'adapter aux nouvelles techniques de radiothérapie. C'est le cas depuis plusieurs années avec la mise en place d'un modèle préclinique d'irradiation de très petits volumes pulmonaires chez la souris. Ce modèle mime les nouveaux protocoles de radiothérapie dite en « conditions stéréotaxiques », utilisée dans le traitement des tumeurs broncho-alvéolaires et caractérisée par l'exposition de petits volumes pulmonaires à de fortes doses par fraction.

L'objectif de ce projet de thèse sera d'étudier la réponse de l'épithélium broncho-alvéolaire après irradiation à fortes doses sur de faibles volumes chez la souris, et en particulier le rôle des cellules club dans le développement des lésions pulmonaires. L'irradiation se fera au SARRP, en utilisant un faisceau collimaté à 3x3 mm^2 et en administrant une dose unique de 80Gy. Ce modèle a été bien décrit au laboratoire grâce aux thèses précédentes et génère une inflammation précoce puis une fibrose pulmonaire. La thèse se déroulera en trois grandes parties. Premièrement, nous utiliserons un modèle de déplétion chimique des cellules club, transitoire ou maintenue, afin de déterminer l'impact de ce type cellulaire sur le développement des lésions radio-induites pulmonaires. Dans un second temps, nous analyserons si l'impact des cellules club sur le développement des lésions pulmonaires passe par la sécrétion d'utéroglobine, spécifique des cellules club. Pour cela, nous administrerons un analogue de l'utéroglobine et suivrons l'impact de ce traitement sur la sévérité des lésions. Enfin, la dernière étape sera de suivre les différents types de cellules épithéliales, dont les cellules club, par analyse séquençage de cellule unique. Ce projet apportera des informations innovantes et originales sur la réaction de l'épithélium broncho-alvéolaire dans un modèle d'irradiation proche des conditions cliniques.

Mots clés : pneumopathie radique, cellules club, épithélium broncho alvéolaire, naphtalène, SARRP, SBRT.

SUJET DE LA THÈSE

Étude des effets potentiellement cancérigènes de l'uranium au niveau rénal à l'aide de modèles murins génétiquement modifiés (UKCAN)

Doctorante :	Laurie DE CASTRO
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LRSI
Référent IRSN de la thèse :	Yann GUEGUEN
Direction de thèse :	Yann GUEGUEN / IRSN & Sophie GAD-LAPITEAU / Institut Gustave Roussy
École doctorale :	Paris-Saclay - Innovation thérapeutique : du fondamental à l'appliqué - ED 569
Financement de la thèse :	IRSN

L'association entre exposition à l'uranium et cancer du rein reste controversée bien que des études épidémiologiques récentes sur les mineurs ou les travailleurs du cycle exposés à l'uranium aient montré une incidence de cancers rénaux supérieure à celle de la population générale. La mise en place d'études expérimentales représentatives de ce type d'exposition s'avère donc nécessaire pour évaluer, si possible précocement, le risque de développement tumoral au niveau rénal lors d'une exposition à l'uranium. Ce projet est rattaché à la thématique de recherche sur la *« radiotoxicologie des expositions chroniques ou répétées »*.

Le protocole d'exposition choisi est une exposition répétée par les voies aériennes supérieures pendant 8 jours par instillation intranasale. La biocinétique de l'uranium par instillation ainsi que le choix de doses d'exposition ont été déterminés lors d'études préliminaires, et font l'objet d'un article *« Renal toxicity and biokinetics models after repeated uranium instillation »*, (De Castro *et al.*, soumis).

Le processus d'initiation et de propagation du cancer du rein pouvant être particulièrement long, deux modèles génétiquement modifiés prédisposés à son développement ont été choisis pour cette étude. Ces modèles murins sont mutés sur les principaux gènes humains de prédisposition (Vhl, Pbrm1, Tsc) pour augmenter l'incidence du cancer du rein et ainsi réduire le nombre d'animaux nécessaires. Ils ont fait l'objet d'une étude phénotypique permettant de définir l'âge d'euthanasie des animaux et de déterminer les paramètres de cancérogénèse pertinents.

Le premier objectif de la thèse consiste à évaluer l'incidence des tumeurs rénales, par analyse histologique et échographique afin de suivre les tumeurs rénales endogènes d'une taille supérieure à 200µm et de déterminer leurs caractéristiques (type, nombre, volume). Les immunomarquages pour les protéines CAIX ou CK7 permettront l'identification, la localisation et la quantification des tumeurs dans le tissu rénal. Le second objectif consiste à étudier les mécanismes moléculaires impliqués dans le développement du cancer du rein, ainsi que les stades et grades tumoraux. Pour cela, les paramètres de biochimie clinique rénaux seront mesurés et un criblage de marqueurs de cancérogénèse sera réalisé par RT-qPCR et protein-array. Des cibles moléculaires spécifiques et préalablement identifiées seront ensuite recherchées dans les urines, le plasma ou les reins par ELISA ou multiplex.

La comparaison des paramètres tumoraux dans ces modèles respectifs en fonction de la dose d'exposition et du temps fournira des connaissances expérimentales pour analyser le lien possible entre l'exposition à l'uranium et le développement du cancer rénal.

Mots clés : cancer du rein, uranium, souris transgénique.

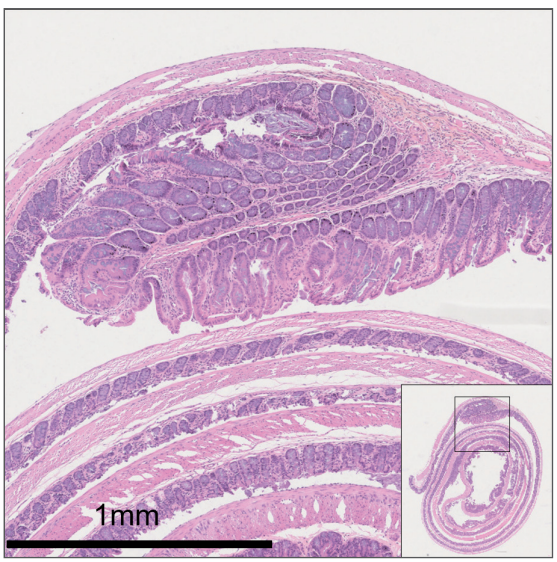
SUJET DE LA THÈSE

Irradiations médicales à faible dose et carcinogenèse du côlon

Doctorante :	Mélissandre GOMOT
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LRTOX
Référent IRSN de la thèse :	Guillaume VARES
Direction de thèse :	Guillaume VARES / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Structure et dynamique des systèmes vivants - ED 577
Financement de la thèse :	IRSN

Chaque jour dans le monde, 500 000 patients bénéficient de procédures d'imagerie médicale diagnostique par tomodensitométrie (CT-scans). Celles-ci consistent à exposer des parties du corps à des faisceaux de rayons X à faible énergie, avec des doses cumulées pouvant atteindre 100 mSv ou plus. L'exposition aux rayonnements ionisants est un facteur de risque connu pour le cancer du côlon (deuxième cause de mortalité par cancer en France), mais les effets résultant d'expositions diagnostiques à faibles doses sont encore mal caractérisés. Ce projet vise à améliorer l'évaluation des risques de cancer du côlon lié aux expositions médicales en participant au développement d'un modèle intégré de réponse cellulaire et moléculaire aux faibles doses de radiations (questions 1 et 5 de la stratégie scientifique de l'IRSN).

Afin de caractériser les effets de ces expositions, nous utilisons un modèle inductible murin de cancer du côlon (KPC:ACP) permettant l'inactivation d'Apc et/ou l'activation de Kras. Après administration de tamoxifène les animaux développent des tumeurs intestinales dont les caractéristiques histologiques et moléculaires sont similaires aux tumeurs colorectales humaines. Ces tumeurs seront caractérisées et les effets d'expositions uniques (25 mGy) ou répétées (25 mGy sur 4 jours consécutifs) seront étudiés. Des organoïdes de côlon seront également établis à partir de souris KPC:APC afin de récapituler *in vitro* la carcinogenèse du côlon dans des organoïdes irradiés suivant le même protocole. Ceci permettra de suivre les mécanismes de prolifération et de différenciation des cellules intestinales. Nous effectuerons des analyses fonctionnelles avec CRISPR/Cas-9, des analyses transcriptomiques, des profilages ribosomiques et l'analyse de méthylations m6A sur l'ARN.



Coupe de colon de souris Kras+/f Apcf/f CreERT2+ 8 semaines après administration de tamoxifène (méthode du Swiss Roll, coloration HES).

La consolidation des données physiologiques et moléculaires dans les modèles murins et organoïdes grâce à des approches de biologie des systèmes devrait contribuer à l'élaboration d'un modèle intégré pour l'évaluation des risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants et permettre une meilleure compréhension de la carcinogenèse du côlon.

Mots clés : cancer du côlon, faible dose de radiation, carcinogenèse.

SUJET DE LA THÈSE

Identification de marqueurs moléculaires de la radiation à faibles doses à partir de données multi-omiques

Doctorante : Elen GOUJON

Date du début de la thèse : 02 / 11 / 2022

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SESANE / LRTOX

Référent IRSN de la thèse : Imene GARALI ZINEDDINE & Olivier ARMANT

Direction de thèse : TENENHAUS / Centrale Supélec

École doctorale : Paris-Saclay - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) - ED 580

Financement de la thèse : IRSN

La Zone d'Exclusion de Tchernobyl (ZET), mise en place après l'accident nucléaire de 1986, a restreint fortement l'activité humaine dans les endroits contaminés aux radiations ionisantes. Toujours en place, la ZET est maintenant un terrain pour l'étude de l'évolution de la faune sauvage en condition d'exposition chronique à des faibles doses de radiations. En particulier, une étude révèle que des populations de rainettes arboricoles *Hyla orientalis* échantillonnées entre 2016 et 2018 présentent une empreinte génétique inhabituelle par rapport à d'autres populations européennes de rainettes *Hyla orientalis* (Car C. *et al*, 2022). Les données extraites pour étudier ces rainettes sont riches et complexes : transcriptomique, dosimétrie individuelle et autres paramètres biologiques (masse, taille, âge) pour 88 rainettes ainsi que génétique et protéomique pour 20 d'entre elles. A travers l'exploration de ces données multi-omiques, on cherche à identifier des changements ou signatures moléculaires spécifiques liés à l'exposition afin de mieux comprendre les effets chroniques des radiations (question 1). La grande dimensionalité de ces données et leur hétérogénéité représentent un défi qu'il s'agit de relever dans le cadre de cette thèse. Plus précisément, l'objectif est d'analyser conjointement les différentes modalités d'information, en tenant compte des facteurs confondants, tels que le site d'origine, et de la présence de données manquantes. Dans ce contexte qui fait écho aux problématiques actuelles pour l'analyse des données biologiques, ce projet de thèse consiste à développer un cadre statistique ou *machine learning* pour l'intégration de données multi-omiques (question 4).

Le premier axe de développement méthodologique concernera l'analyse des données transcriptomiques en relation avec les paramètres biologiques individuels, dont la dosimétrie. Différentes approches sont envisagées : analyse multi-groupes pour gérer l'effet site et approche multi-blocs pour introduire de l'information biologique dans l'algorithme en groupant les variables des données RNA-Seq par voies biologiques. Le second axe du projet sera focalisé sur le développement d'une approche intégrative pour l'analyse conjointe des données transcriptomiques, génétiques et protéomiques, toujours en relation avec la dosimétrie et en prenant en compte les facteurs confondants. Le cadre statistique proposé pour répondre aux problématiques décrites ci-dessus fera l'objet d'un package R. La station de calcul intensif du LRTOX pourra être exploitée pour éprouver les méthodes proposées sur des données simulées et sur les données multi-omiques du projet. Enfin, la dernière étape consistera en l'interprétation des résultats obtenus en appliquant les méthodes développées aux jeux de données omiques des rainettes arboricoles de la ZET.

Mots clés : multi omics, intégration de données, biologie des systèmes, machine learning.

SUJET DE LA THÈSE

Phénomènes de haute énergie dans les systèmes orageux et étude dosimétrique

Doctorant : Yanis HAZEM

Date du début de la thèse : 01 / 10 / 2022

Laboratoire IRSN : PSE-SAN / SDOS / LDRI

Référent IRSN de la thèse : François TROMPIER

Direction de thèse : Sébastien CELESTIN / CNRS

École doctorale : Universite d'orléans - Énergie - Matériaux - Sciences de la terre et de l'univers - ED 552

Financement de la thèse : IRSN & région Centre

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de recherche du GTR1 (Dosimétries), notamment celle répondant à la troisième grande question scientifique, pour le domaine de la radioprotection de l'homme.

Si l'exposition des personnels navigants (PN) vis-à-vis du rayonnement cosmique est suivie (avec l'outil SIEVERT-PN en France), d'autres phénomènes naturels sont susceptibles de contribuer à cette exposition tels que les rayonnements ionisants issus des phénomènes électriques produits lors des orages.

Ces phénomènes radiatifs sont produits par l'accélération des électrons par des champs électriques crées dans les nuages d'orage. Ces processus d'accélération donnent lieu à des phénomènes nommés Terrestrial Gamma Flash (TGF) et Gamma ray Glow (GRG). Le bremsstrahlung associé peut atteindre des énergies de l'ordre de 30-40 MeV et donc également générer des neutrons.

Les doses estimées par simulation peuvent atteindre le Sv au plus près des phénomènes électriques et seulement quelques µSv à distance de l'orage. Cependant les phénomènes mis en jeu ne sont pas encore bien décrits et la fréquence de ces évènements encore mal connue.

Peu de données mesurées dans l'atmosphère étant disponibles, le travail de cette thèse vise à contribuer à l'évaluation réaliste des niveaux d'exposition des PN par la poursuite du développement et la mise en œuvre de moyens de mesure spécifiques.

Ces phénomènes étant très brefs (< 1 ms pour les TGF) et avec des énergies élevées, un prototype de spectromètre gamma fut développé dans le cadre d'une thèse précédente pour réaliser des mesures au-dessus ou dans les orages. Ce détecteur nommé XStorm est muni d'un cristal scintillant de BGO et d'un scintillateur plastique EJ276 de sorte à pouvoir détecter et discriminer les photons et les neutrons.

Le détecteur sera utilisé lors de la campagne CNES Stratéole-2 afin d'observer ces phénomènes depuis la stratosphère au niveau de la région équatoriale. Un autre projet financé par le CNES (OREO) consistera à lâcher plusieurs ballons sondes directement dans une zone orageuse pour effectuer des mesures corrélées. Des mesures au sol sont aussi prévues avec la mise en place d'un réseau de scintillateurs de plus gros volume déployés sur plusieurs sites de haute altitude. Une version avion de Xstorm doit être également installée sur un ou plusieurs long-courriers d'Air France, en complément de la mise en place de dosimétrie gamma passive.

Dans ce poster, nous présenterons le travail effectué durant la première partie de la thèse. Celui-ci consiste à améliorer et caractériser le spectromètre XStorm.

Mots clés : rayonnement cosmique, détecteur, scintillateur, orages.

SUJET DE LA THÈSE

Relations entre l'exposition résidentielle au radon au début de la vie et les effets sur la santé à l'âge adulte, au sein de la cohorte CONSTANCES

Doctorante :	Sylvie HENYOH AFI MAWULAWOE
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Enora CLERO
Direction de thèse :	Olivier LAURENT / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	H2020 RADONORM

L'ensemble de la population est exposé tout au long de sa vie à des niveaux variables de rayonnements ionisants, dont le radon dans l'habitat constitue un contributeur important, en particulier dans les régions où les roches et les sols sont riches en uranium. Aujourd'hui, l'effet cancérigène pulmonaire du radon est bien documenté grâce à des études menées chez des mineurs d'uranium et en population générale exposés essentiellement à l'âge adulte (IARC 1988; WHO 2009). Toutefois, les relations entre l'exposition au radon à différents stades de la vie (enfance, puberté...) et les effets cancérigènes tardifs (à l'âge adulte) restent mal caractérisées. De plus, des questions se posent quant à de possibles autres effets sanitaires du radon tels que certains cancers non-pulmonaires ou encore certaines pathologies non cancéreuses (circulatoires, pulmonaires, neurodégénératives).

Pour étudier ces questions majeures de santé publique, nous analyserons les données au sein de la cohorte CONSTANCES, qui est une large étude française en population générale. Environ 80 000 participants, inclus entre 2010 et 2020, ont renseigné leur historique résidentiel complet depuis la naissance et ont répondu à de nombreux questionnaires sur leurs facteurs de risque de pathologies chroniques. Ceci permettra d'estimer leurs risques de cancers et de pathologies non-cancéreuses associés à l'exposition résidentielle au radon cumulée depuis leur enfance, dans le but d'améliorer les connaissances sur les effets sanitaires de l'exposition chronique à de faibles doses de radon, à des fins d'expertises et de décisions.

La thèse sera structurée en trois grandes étapes comme suit :

- Première année : réalisation d'une revue bibliographique exhaustive sur les effets sanitaires du radon (hors cancer du poumon), identification des pathologies d'intérêt dans la cohorte, croisement des historiques résidentiels des participants avec des données d'exposition résidentielle au radon, estimation de la dose de radon aux organes d'intérêt, analyse descriptive de la cohorte et de l'exposition au radon depuis la naissance.
- Deuxième année : étude des relations dose-risque entre l'exposition au radon et différentes pathologies cancéreuses, circulatoires et pulmonaires, en utilisant des modèles de survie et/ou de régression de Poisson. L'influence de potentiels facteurs de confusion ou d'interaction sera également évaluée (ex : tabac, alcool, alimentation, surpoids...).
- Troisième année : étude de la relation dose-risque entre l'exposition au radon et différentes pathologies neurodégénératives.

Mots clés : radon, cohorte CONSTANCES, cancers, maladies cardiopulmonaires, maladies neurodégénératives.

SUJET DE LA THÈSE

Réponse de l'endothélium vasculaire à l'irradiation *in vivo* : intérêt pour la prédiction du risque de toxicité après radiothérapie

Doctorante :	Claire LAGO
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Olivier GUIPAUD
Direction de thèse :	Olivier GUIPAUD / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Cancérologie, biologie, médecine, santé - ED 582
Financement de la thèse :	IRSN & EDF

Ce projet de thèse s'inscrit dans les programmes de recherche menés par l'IRSN visant à accroître les connaissances sur les mécanismes d'initiation et de progression des effets secondaires de la radiothérapie qui touchent les tissus sains situés au voisinage de la tumeur. Dans ce programme, un intérêt particulier est porté sur les cellules endothéliales vasculaires, qui tapissent l'intérieur de tous les vaisseaux sanguins, car elles jouent un rôle crucial dans l'établissement des lésions radio-induites, notamment par leur fonction essentielle dans la réponse immuno-inflammatoire en régulant le recrutement de cellules immunitaires. La réponse de ces cellules *in vitro* est déjà bien caractérisée. De manière intéressante, elles répondent différemment à des irradiations qui varient par le débit de dose ou l'énergie, ce qui en fait un outil prometteur pour estimer l'impact de diverses situations d'irradiation. En revanche, la réponse moléculaire et le rôle de ces cellules *in vivo* sont méconnus, alors qu'elles représentent une cible intéressante tant pour diminuer les effets secondaires de la radiothérapie que pour favoriser le contrôle tumoral.

La thèse propose d'étudier la réponse moléculaire des cellules endothéliales de poumons irradiés chez la souris afin d'ouvrir des voies de recherche déterminantes pour comprendre la réponse des tissus sains à l'irradiation, en particulier dans le cadre des nouvelles pratiques de radiothérapie comme la radiothérapie Flash. Des souris seront irradiées au niveau du thorax à différents débits de doses et énergies pour induire une fibrose pulmonaire à long terme. A différents temps d'étude après irradiation, les cellules endothéliales et les cellules immunitaires seront isolées des poumons. Pour cela, des suspensions de cellules seront préparées par digestion enzymatique, puis les cellules endothéliales et immunitaires seront purifiées par des anticorps couplés à des billes magnétiques. Des études fonctionnelles et moléculaires seront réalisées sur ces cellules et les niveaux d'expression des gènes seront étudiés à l'échelle de la cellule unique par séquençage de l'ARN (scRNA-seq). Les données seront analysées avec des outils mathématiques et bio-informatiques afin d'identifier les gènes et les voies moléculaires en jeu dans la réponse à l'irradiation, et pour étudier les interactions entre les cellules endothéliales et immunitaires, une étape clé du recrutement des cellules immunitaires. Les résultats attendus permettront de comprendre comment les cellules endothéliales répondent à l'irradiation *in vivo* et de déterminer comment ces réponses diffèrent entre des modalités d'irradiation variées de façon à compléter le modèle de prédiction du risque développé dans le laboratoire.

Mots clés : endothélium, irradiation, immunité, flash, fibrose.

SUJET DE LA THÈSE

Étude de la complexation des ions lanthanides avec les acides hydroxamiques pour des applications en médecine nucléaire

Doctorante :	Sabine LAM
Date du début de la thèse :	01 / 12 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LRSI
Référent IRSN de la thèse :	Guillaume PHAN
Direction de thèse :	Vladimir SLADKOV / CNRS
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN & CNRS

La médecine nucléaire connait un essor important, les avancées dans ce domaine ont permis l'émergence de nouveaux radiopharmaceutiques permettant de développer le diagnostic et la thérapie pour permettre un traitement plus adapté au patient. Une nouvelle stratégie permettant le traitement personnalisé est l'approche « théranostique », construite à partir des termes thérapie et diagnostic, elle associe un test diagnostic individualisé puis un traitement spécifique au patient dans le cadre d'une approche unifiée grâce à un médicament radiopharmaceutique (composé d'un radionucléide relié via un ligand à un vecteur biologique). Cette approche sera amenée à prendre une place importante dans les prochaines années - notamment pour les traitements oncologiques. De plus, la multiplication des médicaments radiopharmaceutiques va considérablement augmenter les perspectives d'application en médecine nucléaire. Afin d'appréhender les nouveaux enjeux notamment en termes de radioprotection, l'IRSN doit réaliser des travaux de recherche pour évaluer les risques inhérents à ces nouveaux traitements, et particulièrement à leur toxicité sur les tissus sains. Ce projet de thèse constitue une réelle opportunité car elle ouvrira le champ d'application des radio-isotopes du terbium Tb en médecine nucléaire, en apportant des informations sur la toxicité cellulaire de l'élément chimique Tb seul ou complexé avec les ligands hydroxamiques, étape cruciale en vue de la mise au point du radiopharmaceutique.

L'objectif de la thèse est de caractériser les propriétés des complexes des ions lanthanides (dont le terbium) avec les acides hydroxamiques en solution d'un point de vue structural et thermodynamique dans le but de sélectionner le ligand optimal en termes de stabilité et de liaison rapide. Au cours de la première année de thèse, la complexation de Tb (III) par les ligands organiques sera étudiée à IJCLab et au LRSI en utilisant au moins 2 méthodes, l'électrophorèse capillaire d'affinité avec détection UV et l'extraction liquide ionique avec détection ICP-MS. L'ensemble de ces résultats permettra de sélectionner les ligands les plus prometteurs en termes de stabilité de complexation. Au cours de la deuxième année, la stabilité des complexes Tb (III) avec les ligands hydroxamiques sera étudiée *in vitro* au LRSI dans des conditions mimant les milieux biologiques. Des études de cytotoxicité *in vitro* seront enfin réalisées la troisième année au LRSI pour déterminer l'innocuité du Tb stable et du complexe Tb-acide hydroxamique sur des cellules hépatiques ou rénales.

Mots clés : complexation, terbium, acide hydroxamique, lanthanide, radiopharmaceutique.

SUJET DE LA THÈSE

Détecteurs Diamant ultra-Minces pour le Monitorage en ligne de MicroFaisceaux d'Ions - DéFI-DiaMs

Doctorante :	Claire LÉONHART
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LMDN
Référent IRSN de la thèse :	François VIANNA
Direction de thèse :	Marie-laure GALLIN-MARTEL / LPSC Grenoble
École doctorale :	Grenoble-Alpes - École doctorale de physique - ED 47
Financement de la thèse :	IRSN & CNRS

L'installation MIRCOM du LMDN, sur le site de Cadarache, est un microfaisceau d'ions extrait à l'air capable d'irradier des échantillons biologiques à l'échelle micrométrique pour étudier les mécanismes cellulaires post-irradiation. Cette thèse s'inscrit dans la question de recherche 5 de la stratégie scientifique de l'IRSN, visant à mieux identifier et prévenir les effets secondaires résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Afin d'utiliser les capacités de la ligne dans leur totalité, et en particulier d'étudier les effets d'une exposition à de faibles doses (question 1) avec une irradiation à un ion unique par cellule, il est nécessaire de pouvoir détecter les ions délivrés lors de l'irradiation. Le détecteur diamant développé dans le cadre du projet DéFi-DiaMs doit permettre de remplir ce besoin pour les protons mais également pour les ions plus lourds disponibles. Le dispositif sera également adapté pour la ligne de micro-irradiation de la plate-forme AIFIRA du LP2I Bordeaux. Le diamant est un semi-conducteur à grand gap, rapide, étudié au LPSC pour le développement de détecteurs de particules. Son application à la micro-irradiation répond à la problématique mais pose de nombreux défis technologiques.

Le travail de la première année est le développement de techniques de gravure pour l'amincissement du diamant avec l'Institut Néel. En effet, les ions s'arrêtant dans les échantillons biologiques, le détecteur doit être placé en amont et alors avoir une épaisseur faible pour limiter la perturbation du faisceau (dégradation de son diamètre et de son énergie). Différentes méthodes seront explorées comme la gravure par Reactive Ion Etching et la gravure catalytique pour obtenir une épaisseur de l'ordre du micromètre avec une bonne qualité de surface, nécessaire à la collecte de charges.

L'intégration du dispositif sur les lignes devra répondre aux contraintes mécaniques et à l'encombrement géométrique. Le détecteur sera l'interface entre le vide de la ligne et l'air. Le design sera réfléchi de telle sorte à supporter le différentiel de pression, à minimiser l'épaisseur de matière susceptible de perturber le faisceau et à accueillir les connecteurs électroniques nécessaires à la collecte du signal.

Les diamants utilisés seront caractérisés avant l'intégration au dispositif, notamment sur un banc de tests en développement basé sur une source beta fortement collimatée qui permettra d'obtenir une cartographie micrométrique de la réponse des détecteurs diamants.

Enfin, l'efficacité de détection sur les lignes de micro-irradiation sera déterminée et l'impact de la détection sur le faisceau sera caractérisé.

Mots clés : microfaisceaux d'ions, monitorage faisceau, radiobiologie, détecteurs diamant, gravure RIE, gravure catalytique.

SUJET DE LA THÈSE

Optimisation de la radiothérapie interne vectorisée avec le 177Lu-PSMA-617 pour le cancer métastatique de la prostate résistant à la castration : quelle méthode pour une estimation personnalisée de la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque ?

Doctorant :	Alexandre PIGNARD
Date du début de la thèse :	03 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SDOS / LEDI
Référent IRSN de la thèse :	Stéphanie LAMART
Direction de thèse :	Didier FRANCK / IRSN
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

La radiothérapie interne vectorisée consiste à cibler et traiter un cancer ou une affection bénigne à l'aide d'un médicament radiopharmaceutique (MRP), constitué d'un radionucléide associé à un vecteur biologique, tel que le ^{177}Lu-PSMA-617. Ce MRP a été développé pour le traitement des cancers métastatiques de la prostate résistants à la castration et dispose en France d'une Autorisation d'Accès Précoce. Les patients éligibles à ce traitement sont attendus en grand nombre ces prochaines années. La réalisation d'une dosimétrie pourrait permettre une amélioration de la prise en charge de ces patients, elle n'est pourtant pas requise en routine clinique actuellement. En effet, comme pour les autres MRP, le protocole de traitement préconise d'administrer la même activité à tous les patients. Cependant, la distribution spatio-temporelle du MRP, appelée biocinétique, dépend du patient et détermine la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque. Les traitements ainsi réalisés peuvent conduire à une administration qui ne serait pas adaptée : un surdosage entraînant des toxicités aux organes à risque (reins, glandes salivaires et moelle rouge), ou un sous-dosage pouvant rendre inefficace le traitement et constituer une perte de chance pour le patient par rapport à un traitement optimal.

L'objectif de la thèse est donc d'établir une méthode suffisamment personnalisée afin d'évaluer la dose absorbée aux lésions et aux organes à risque pour un traitement au ^{177}Lu-PSMA-617, et de prévenir les effets secondaires de cette thérapie dans les tissus sains.

La première étape consistera à identifier, rassembler et organiser les données cliniques de patients nécessaires, provenant de différents centres partenaires de l'étude. La deuxième étape sera consacrée au développement et à la mise en œuvre de méthodes et d'outils pour les calculs personnalisés de dose absorbée. Ceux-ci reposent sur l'utilisation des images anatomiques du patient et des images de distribution du MRP à plusieurs temps après administration, afin de caractériser sa biocinétique et le dépôt d'énergie aux lésions et aux organes à risque. Ces calculs seront réalisés à l'aide de différents logiciels, dont l'Outil d'Evaluation de la Dose Interne Personnalisée (OEDIPE) développé à l'IRSN. Une analyse statistique sera ensuite réalisée afin d'évaluer les corrélations entre les résultats dosimétriques et les effets biologiques observés. Enfin, l'acquisition d'images en médecine nucléaire étant souvent limitée par la faisabilité clinique, une étude de sensibilité pourra notamment être conduite pour proposer des voies d'optimisation du protocole dosimétrique pour la routine clinique et formuler des recommandations pour les futurs traitements.

Mots clés : radiothérapie interne vectorisée, dosimétrie personnalisée, ^{177}Lu-PSMA, cancer métastatique de la prostate, radioprotection.

SUJET DE LA THÈSE

Thérapie cellulaire par les cellules souches mésenchymateuses (CSM) des atteintes tissulaires de la vessie après radiothérapie

Doctorante :	Anne-Laure POULIET
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRMed
Référent IRSN de la thèse :	Alain CHAPEL
Direction de thèse :	Alain CHAPEL / IRSN
École doctorale :	Sorbonne Université - Physiologie, physiopathologie, thérapeutique - ED 394
Financement de la thèse :	IRSN

Aujourd'hui, la radiothérapie externe est utilisée comme traitement de plus de 50 % des cancers. Malgré les nombreux progrès dans ce domaine, la radiothérapie peut s'accompagner d'effets secondaires en raison de la présence de tissus sains dans le champ d'irradiation. En moyenne, 5 ans après traitement, 5 à 10 % des patients développent des complications tardives. Au niveau de la sphère abdomino-pelvienne, il existe plusieurs organes à risques au voisinage de la zone d'irradiation comme la vessie et le rectum. Ce sujet de thèse s'intéresse à la cystite radique chronique qui est une atteinte de la vessie après radiothérapie et a pour objectif d'étudier les mécanismes moléculaires de l'action d'un traitement par CSM de la cystite radique chronique (CRC). Il s'inscrit dans l'un des enjeux de l'IRSN qui vise à identifier et à prévenir les effets secondaires des rayonnements ionisants. Les traitements existants de la CRC sont souvent symptomatiques et transitoires. De nouvelles stratégies basées sur les CSM ont montré leur efficacité thérapeutique dans le cadre d'essais cliniques sur les cystites hémorragiques. Dans des pathologies similaires comme la cystite interstitielle et hémorragique, les CSM ont permis de diminuer l'inflammation et la fibrose et de stimuler la régénération tissulaire. Les résultats d'une thèse précédente au laboratoire confirment en partie que le traitement par les CSM de la cystite radique limite les atteintes de la vessie par des mécanismes analogues aux mécanismes décrits pour le traitement de la rectite radique. Cependant des points demeurent à éclaircir afin de répondre à un certain nombre de questionnements sur l'effet thérapeutique des CSM.

Ce sujet de thèse permettra de comprendre les effets des CSM sur la neuroinflammation, la caractérisation des mécanismes de la régénération de l'urothélium et le maintien de son imperméabilité, la protection vasculaire, la réduction de l'inflammation et de la fibrose. Afin de répondre à ces différentes questions, un modèle de cystite radique chez le rat a été développé. L'irradiation de la vessie dans son intégralité avec deux faisceaux à dose unique de 40 Gy est réalisée grâce à une plateforme d'irradiation du petit animal (SARRP). Les CSM sont injectées par voie intra-veineuse à 4,5 mois post irradiation avec 3 injections séparées de 15 jours dans le but de potentialiser l'effet du traitement en phase chronique. A partir des échantillons, différentes analyses histologiques, transcriptomiques et moléculaires seront réalisées.

Mots clés : radiothérapie, thérapie cellulaire, cystite radique.

SUJET DE LA THÈSE

Caractérisation et utilisation des scintillateurs stilbène pour la métrologie et la spectrométrie des neutrons entre 100 keV et 22 MeV sur AMANDE et CEZANE

Doctorante :	Diane QUEVAUVILLERS
Date du début de la thèse :	3 octobre 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN/SDOS/LMDN
Référent IRSN de la thèse :	Michaël PETIT
Direction de thèse :	Laurent OTTAVIANI / AMU & Christelle REYNARD-CARETTE / CNRS
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & LNE

La thèse se positionne sur la question 3 de la stratégie de l'IRSN pour l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif à l'exposition aux rayonnements ionisants. Le LMDN, Laboratoire de micro-irradiation, de métrologie et de dosimétrie neutrons est en charge par le LNE, Laboratoire National de métrologie et d'Essais, des références métrologiques françaises en débit de fluences neutroniques et dosimétriques associées. Ainsi, le LMDN cherche à améliorer ses références pour perfectionner l'étalonnage des dosimètres et des détecteurs de neutrons.

En 2020, des cristaux stilbènes plus purs ont démontré une nouvelle capacité de détection et de discrimination entre neutrons et photons particulièrement entre 100 keV et 1 MeV, décade non couverte aujourd'hui par les scintillateurs classiques. Le LMDN a acheté des nouveaux scintillateurs avec ces cristaux pour améliorer la détermination de ses références et élargir sa plage d'étude. Le LMDN est aussi responsable de deux sources de neutrons qui sont les références françaises primaires pour la métrologie de la dosimétrie dans ce domaine. Malheureusement, ces sources sont imparfaites et aujourd'hui, aucun moyen ne permet de corriger leurs imperfections.

Ainsi, la thèse réalisée avec Aix-Marseille Université (IM2NP UMR 7334) est axée sur les besoins métrologiques du laboratoire. Pour cela, un des trois objectifs de la thèse est la caractérisation de ces scintillateurs. Cette opération consiste à déterminer leurs fonctions réponses grâce à des simulations et des expériences sur des installations de références métrologiques en France et en Europe. Une étude spécifique des fonctions réponses sera réalisée pour la plage 100 keV-1 MeV, peu connue.

Le second objectif est d'exploiter la réponse très rapide des scintillateurs pour pouvoir étendre la méthode de temps de vol à la plage 100 keV-1 MeV sur l'installation AMANDE de l'IRSN. Cette méthode est la méthode métrologique usuelle pour déterminer l'énergie des neutrons basée sur la différence entre le temps d'émission et de détection du neutron après avoir « volé » sur une distance connue.

Enfin, le suivi de la décroissance de ces sources sera réalisé afin de déterminer des correctifs et donc d'étalonner au mieux les dispositifs de mesure neutrons. Pour cela, la méthode du temps de vol sera exploitée sur ces sources avec deux scintillateurs stilbènes et deux scintillateurs EJ309 en coïncidence. Cette méthode dite « de vérification croisée » permettra également de vérifier périodiquement les fonctions réponses des scintillateurs déterminées précédemment.

Cet ensemble de moyens de détection permettra de répondre aux besoins métrologiques du laboratoire.

Mots clés : spectromètrie neutron, temps de vol, scintillateur, métrologie.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation spatio-temporelle et outils d'IA pour l'analyse dose-réponse et la prédiction de lésions cérébrales et de troubles cognitifs radio-induits chez des patients traités par radiothérapie pour un glioblastome

Doctorant :	Théo SILVESTRE
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SESANE / LEPID
Référent IRSN de la thèse :	Sophie ANCELET
Direction de thèse :	Sophie ANCELET / IRSN & Florence FORBES / INRIA
École doctorale :	Paris-Saclay - Santé publique - ED 570
Financement de la thèse :	ANR RADIO-AIDE

Cette thèse de biostatistique s'inscrit au sein du projet ANR « RADIO-AIDE » dont l'objectif est de développer des modèles probabilistes spatio-temporels (ST) et de nouveaux outils d'intelligence artificielle (IA) pour mieux comprendre les mécanismes neurotoxiques sous-jacents à l'apparition de lésions cérébrales visibles à l'IRM et de troubles cognitifs chez des patients traités par radiothérapie (RT) pour un glioblastome. RADIO-AIDE s'appuie sur les données de la cohorte prospective EpiBrainRad qui inclut actuellement 250 patients traités pour un glioblastome à l'hôpital de la Pitié Salpêtrière ou à l'Institut de Cancérologie de Strasbourg Europe. La toxicité potentielle de la RT cérébrale sur le système nerveux central fait partie des questions de recherche prioritaires de l'IRSN en radioprotection concernant l'identification et la prévention des effets secondaires dits "non-cancer" résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants (RI) à des fins thérapeutiques.

L'objectif de la thèse est de développer des modèles ST et des outils d'IA qui doivent permettre de répondre à 3 sous-objectifs, définissant chacun un axe de recherche spécifique :

1. Estimer l'association potentielle entre la progression ST de lésions cérébrales post-RT et la répartition spatiale de la dose de RI absorbée au cerveau chez des patients traités par RT pour un glioblastome. Pour ce faire, des modèles ST (modèles GLLiM, régression sur variable fonctionnelle, etc.) et des algorithmes d'apprentissage statistique seront développés, mis en œuvre et validés à partir des données EpiBrainRad et de données simulées.
2. Estimer l'association potentielle entre l'apparition de troubles cognitifs chez des patients traités par RT pour un glioblastome et a) la progression ST de lésions cérébrales post-RT; b) la répartition spatiale de la dose de RI absorbée au cerveau. Cela impliquera d'étendre le(s) modèle(s) précédemment proposé(s) en modélisant des données de scores cognitifs évalués en différents temps de suivi et en tenant compte du statut tumoral du patient.
3. Prédire l'occurrence individuelle de troubles cognitifs chez des patients atteints de glioblastome à un stade précoce après la RT, avec une quantification des incertitudes de prédiction associées. Cela impliquera de comparer les prédictions obtenues avec les modèles probabilistes ST précédemment définis aux prédictions obtenues à partir du développement d'une approche par *Deep Learning* bayésien.

L'un des intérêts de cette thèse est l'amélioration des méthodes et outils destinés à évaluer le risque consécutif aux expositions des patients aux RIs. Cela fait également partie des priorités de recherche de l'IRSN dans le domaine de la radioprotection de l'homme.

Mots clés : biostatistique, statistique bayésienne, modèlisation spatio temporelle, rayonnements ionisants, radiothérapie, radioprotection.

SUJET DE LA THÈSE

La réponse aux dommages de l'ADN dans le maintien de la stabilité myotubulaire après exposition aux rayonnements ionisants

Doctorant :	Arthur THOMAS-JOYEUX
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSE-SAN / SERAMED / LRAcc
Référent IRSN de la thèse :	Céline BALDEYRON
Direction de thèse :	Marc BENDERITTER / IRSN
École doctorale :	Sorbonne Paris Cité - Bio Sorbonne Paris Cité (BIOSPC) - ED 562
Financement de la thèse :	IRSN

La radiothérapie reste aujourd'hui incontournable dans la prise en charge de nombreux cancers. Malgré l'amélioration continue des méthodes et techniques d'irradiation de mieux en mieux ciblées et personnalisées, nombre de tissus et d'organes sains adjacents demeurent exposés. Ainsi, le muscle strié squelettique, représentant plus de 40% de la masse corporelle, se trouve de manière récurrente dans le champ de l'irradiation. Bien que le muscle strié soit considéré comme relativement résistant aux rayonnements ionisants (RI), des lésions musculosquelettiques ont été rapportées comme des effets cliniques tardifs des traitements par radiothérapie, ces séquelles étant d'autant plus important que l'exposition est précoce.

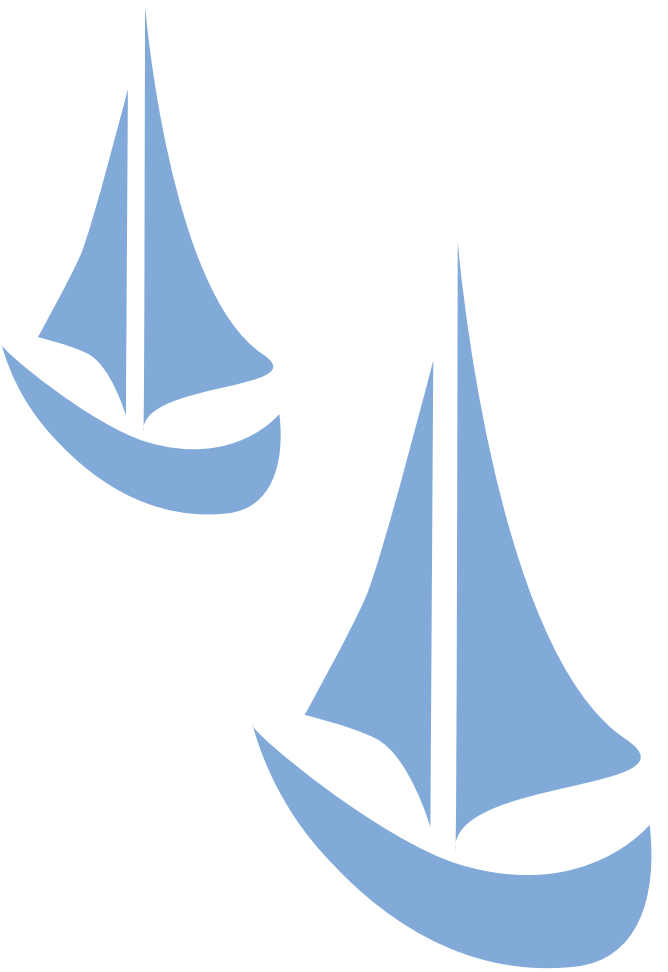
Les mécanismes moléculaires précis qui régissent la réponse des cellules musculaires squelettiques matures à l'irradiation et le maintien de l'homéostasie du tissu musculaire sont peu décrit dans la littérature médicale et scientifique. Nous avançons l'hypothèse que la prise en charge des lésions radio-induites de l'ADN dans les cellules multinucléés soit régulée différemment, conférant aux cellules musculaires squelettiques leur radiorésistance. Mon travail de thèse, rattaché à la question 5 de la stratégie scientifique de l'IRSN pour le domaine de la Radioprotection, consiste à comprendre comment, après endommagement d'un ou plusieurs myo-noyaux, le myotube mature maintient les fonctions cellulaires, telles que la réparation de l'ADN, l'organisation fonctionnelle de la chromatine et la communication entre les myo-noyaux d'un même syncytium.

Les principaux objectifs sont :

1. La comparaison des mécanismes de prise en charge des lésions de l'ADN dans les cellules multinucléés par rapport aux cellules mononuclées.
2. L'investigation des effets de l'endommagement d'un noyau en fonction de la nature et de la dose du rayonnement utilisé, du nombre de dommages et de la nature de la chromatine ciblée, sur les autres noyaux du syncytium.
3. Les conséquences de l'endommagement létal d'un ou plusieurs myo-noyaux sur la stabilité et le maintien des fonctions du syncytium. La stratégie expérimentale de ce travail repose sur l'utilisation (i) d'un système *in vitro* de différenciation myofibrillogénique à partir de cellule primaire ou de lignée myoblastique, et (ii) d'une technologie unique permettant l'induction de dommages de l'ADN avec une précision micrométrique : microfaisceau d'ions, MIRCOM couplé à un microscope épifluorescent.

In fine, cette étude permettra d'accroître nos connaissances sur les mécanismes moléculaires agissant précocement suite à une exposition aux RI et sur les effets dose au muscle.

Mots clés : radiothérapie, muscle strié squelettique, dommage radio induit, ADN, chromatine.



Salle Frédéric Mistral

Mercredi 29 mars 13 h 30 - 14 h 30
Jeudi 30 mars 13 h 30 - 14 h 30

Doctorants de 1re année
PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

UNITÉ DE RECHERCHE EN SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fouzia DJERIOUAT - Étude de la rétention par barbotage de produits de fission avec prise en compte de l'impact d'un milieu salin - contexte PN et SMR.

Kushal Gowda JAYARAM - Understanding the mechanisms and phenomena of low cycle fatigue of nickel 690 alloy in a PWR environment.

Mtoilibou Abdallah KEYMOON - Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en solutions en conditions APRP et AG.

Estelle LAGARDERE - Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement.

Anis LOUCHAMI - Calcul de la force et du couple hydrodynamiques sur une particule solide glissante près d'une paroi solide glissante en présence d'un écoulement de cisaillement.

Mohamed Dahi M'HAYHAM - Modélisation des spectres alpha d'aérosols radioactifs et métrologie des données d'entrée par technologie des micro-capteurs aérosol – Application aux moniteurs de radioprotection utilisés dans des atmosphères atypiques par rapport aux référentiels normatifs IEC.

Loïc PERRIN - Étude expérimentale et numérique des écoulements et de la stratification des gaz lors d'un feu dans un local confiné et mécaniquement ventilé – Application aux scénarios d'incendie en milieu sous-oxygéné.

Pierre SOLÉ - Développement d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité des incertitudes sur les données nucléaires formalisées dans les matrices de covariance.

Dorian TRABICHET - Développement d'une approche de densité de probabilité de flammelettes pour la déflagration et comparaison avec la simulation des grandes échelles.

SUJET DE LA THÈSE

Étude de la rétention par barbotage de produits de fission avec prise en compte de l'impact d'un milieu salin - contexte PN et SMR

Doctorante :	Fouzia DJERIOUAT
Date du début de la thèse :	10 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Référent IRSN de la thèse :	Philippe NERISSON & Catherine MARCHETTO
Direction de thèse :	Olivier VAUQUELIN / AMU & Maxime CHINAUD / AMU
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN

Lors d'un accident grave de réacteur nucléaire, des produits de fission (PF) peuvent être relâchés dans l'atmosphère, constituant une menace pour l'environnement et la population. Ainsi, l'étude du transfert de radionucléides tels que le césium et l'iode est nécessaire, afin d'évaluer d'une part le risque qu'ils engendrent et d'autre part de développer des moyens de mitigation limitant les potentiels rejets. L'IRSN mène des recherches sur le sujet (question de recherche S1), notamment par un processus de piégeage des PF contenus dans un gaz porteur lors de son passage dans un bain liquide. Ce dernier processus, appelé *« pool scrubbing »*, peut se présenter dans différentes situations accidentelles dans les REP avec les FCVS (*Filtered Containment Venting System*) et la RTGV (Rupture de Tubes de Générateur de Vapeur), ainsi que dans les sous-marins à propulsion nucléaire où la solution proposée est d'immerger le navire. Le pool scrubbing est susceptible de survenir également dans les SMR (*Small Modular Reactor*) à eau pressurisée (projet européen NUWARD).

Le sujet de thèse s'inscrit dans la suite des travaux de thèse de Mohamad Farhat (soutenue fin 2022). Plus précisément, les deux objectifs principaux sont les suivants :

- Caractériser l'hydrodynamique des bulles et le piégeage en milieu salin (propulsion navale) où peu de données sont recensées dans la littérature. Les PF étudiés seront les iodes volatils (I_2, CH_3I) et les aérosols (CsI, CsOH, ...), le piégeage de ces PF étant évalué à partir des facteurs de décontamination (DF).
- Améliorer la caractérisation et la modélisation de l'hydrodynamique dans la zone de panache de l'écoulement à bulles (travaux précédemment focalisés sur la zone d'injection).

Les études expérimentales seront menées dans le dispositif TYFON « *Trapping and hYdrodynamics for FissiON products behaviour in pool scrubbing* » permettant de réaliser des essais à différents régimes d'injection (caractérisés par le nombre de Weber) du gaz vecteur. TYFON dispose de hublots plans permettant de visualiser par caméra rapide la forme des bulles engendrées. Ces éléments permettront de déterminer les paramètres de l'hydrodynamique (volume, surface d'échange, vitesse terminale, taux de vide...). L'hydrodynamique du panache sera également étudiée expérimentalement sur un dispositif dédié de l'IUSTI à Marseille (méthodes d'échographie, de métrologie acoustique...). L'ensemble des données expérimentales recueillies (hydrodynamique et DF) sera utilisé pour améliorer la modélisation du phénomène de *pool scrubbing* dans le code ASTEC, développé par l'IRSN.

Mots clés : mitigation des rejets, pool scrubbing, milieu salin, panache de bulles, modélisation hydrodynamique.

SUJET DE LA THÈSE

Understanding the mechanisms and phenomena of low cycle fatigue of nickel 690 alloy in a PWR environment

Doctorant :	Kushal Gowda JAYARAM
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEREX / LE2M
Référent IRSN de la thèse :	Joseph HURET & Walter CHITTY
Direction de thèse :	Gilbert HENAFF / ISAE-ENSMA
École doctorale :	Universités de Poitiers & de Limoges - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME) - ED 609
Financement de la thèse :	IRSN

Due to thermal transients from the various operating phases of primary circuit in light water reactor, components are subject to an aging mechanism called fatigue. Fatigue is a phenomenon where a structure fails prematurely when subjected to cyclic loading. In the primary circuit this phenomenon is aggravated by the environment which is chemically active in nature. This results in environmentally assisted fatigue (EAF) and is characterized by a shorter fatigue life. EAF of the stainless-steel components in light water reactors has been the subject of extensive research and regulatory interest in France and abroad. Although majority of the components in the primary circuit are made of stainless steels, some are made of nickel 690 alloy. As a result, there is very little literature research on EAF of nickel alloys and therefore it is identified as the interest of IRSN to evaluate the effects of the environment on 690 alloy.

To fulfil the objective, the thesis work will include several phases. Firstly, to carry out a bibliographical survey in order to develop a state of the art on the EAF and to define the test matrices closest to the real solicitations in the operation of the plants. Since air is a sufficiently reactive medium, we cannot consider it for the reference curve. So, at first the reference curve will be built in the vacuum condition, and then the tests in air and in PWR environment, in order to compare the average curve of the alloy in air and PWR environment with the reference curve. Finally, the determination of the average curves serves as a baseline data for the material studied. But the heart of the subject will focus on the identification of the main parameters and mechanisms by which the PWR environment reduces the life of the alloy, on one hand through realization of interrupted tests, and on the other hand through microstructural analysis at the end of crack. Fractured tests observation will help to determine striations distance and potentially cracking speed by tests medium, interrupted tests in PWR environment provides details on mechanisms of initiation and propagation of cracks. Therefore, the objectives of the thesis are through experimental work, analysis and interpretation, to identify the parameters and to give the first elements of understanding on the mechanisms and phenomena by which the environment influences fatigue cracking.

Mots clés : nickel 690 alloy, LCF, environmentally assisted fatigue.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale des effets chimiques sur le colmatage d'un filtre en solutions en conditions APRP et AG

Doctorant :	Mtoilibou abdallah KEYMOON
Date du début de la thèse :	01 / 03 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SEREX / L2EC
Référent IRSN de la thèse :	William LE SAUX
Direction de thèse :	Marie-odile SIMONNOT / Université de Lorraine & Laurent CANTREL / IRSN
École doctorale :	Lorraine - SIMPPE - Sciences et ingénierie des molécules, des produits, des procédés, et de l'énergie - ED 608
Financement de la thèse :	IRSN

Lors d'un accident de type APRP impliquant une brèche sur le circuit primaire d'une centrale nucléaire, des débris sont générés par le jet et peuvent être transportés jusqu'au filtre RIS-EAS des puisards situés au fond de l'enceinte de confinement du réacteur. Ces débris peuvent contribuer au colmatage physique et potentiellement chimique de ces filtres. La contribution chimique correspond à la formation de précipités/gels au sein du lit de débris. La formation de ces précipités résulte de la présence en solution de cations métalliques suite à la dissolution partielle des isolants et la corrosion des surfaces métalliques. En cas d'accident grave (AG) avec fusion partielle du cœur, des sources additionnelles de débris sont à considérer comme la présence de particules formées de matériaux de structure, de produits de fission insolubles et des particules de béton résultant d'une possible interaction corium-béton. Les conditions thermo-hydrauliques et chimiques dans un AG sont différentes de celles de l'APRP (température, vitesse d'approche sur le filtre, radiation, contamination).

Pour être en mesure d'appréhender cette situation, améliorer la compréhension du phénomène de colmatage chimique est nécessaire. L'objectif de ces travaux de recherche est d'étudier la nature de ces effets chimiques, les paramètres les conditionnant et leur ampleur en situation d'APRP et AG.

Le présent sujet de thèse s'inscrit dans la suite des travaux de thèse de Coralie Le Maout-Alvarez, qui a étudié les effets chimiques sur le palier des REP 900 MWe en situation d'APRP.

Pour mener à bien cette étude, la méthodologie expérimentale, développée durant le travail de thèse sur les REP 900 MWe pourra être appliquée : une première partie sera orientée sur la formation en condition statique des potentiels précipités susceptibles de se former en situation d'APRP ou AG ; par la suite, des essais seront réalisés dans une boucle en recirculation (dispositif COPIN – COlmatage des Puisards dans l'Industrie Nucléaire), dans lequel des débris seront injectés en respectant les facteurs d'échelle. Des mesures en ligne (pH, turbidité, température et pression) seront effectuées afin de pouvoir étudier leur impact sur le colmatage « chimique ». Enfin, Les résultats des essais en conditions statiques et dynamiques seront couplés à une approche thermodynamique grâce à des outils de calcul géochimique (CHESS et PHREEQC) afin de vérifier la cohérence entre les précipités obtenus et ceux prédits. L'objectif est de corréler la perte de charge chimique avec la température et la masse de précipités au sein du lit fibreux.

Mots clés : colmatage, filtre, accident, effets chimiques.

SUJET DE LA THÈSE

Corrosion des tubes de générateurs de vapeur et effets du plomb et du soufre sur les mécanismes d'endommagement

Doctorante :	Estelle LAGARDERE
Date du début de la thèse :	02 / 11 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP / SES / BECM
Référent IRSN de la thèse :	Ian DE CURIERES
Direction de thèse :	Lydia LAFFONT / Université de Toulouse
École doctorale :	Toulouse 3 - Sciences de la matière - ED 482
Financement de la thèse :	IRSN & CNL

Dans les centrales nucléaires, la dégradation des tubes de générateurs de vapeur (GV) constitue un risque de perte de confinement et de relâchement de produits radioactifs dans l'atmosphère. Dans l'optique de mieux comprendre la dégradation de ces tubes en milieu secondaire, il est nécessaire d'étudier l'influence de l'environnement sur les phénomènes de fragilisation des tubes de GV, en prenant en compte le rôle des produits de corrosion et des résidus de polluants dans ces mécanismes. Les recherches menées lors de cette thèse ont ainsi pour objectif d'analyser l'effet du plomb et du soufre, polluants parfois présents dans le milieu secondaire des réacteurs à eau sous pression, sur la sensibilité à la corrosion sous contrainte en peau externe des tubes de GV.

Cette étude est menée sur trois types d'alliages base nickel utilisés dans les tubes de GV : l'Inconel 690 TT (traité thermiquement), l'Inconel 600 TT (traité thermiquement) et l'Inconel 600 MA (recuit). Afin d'étudier les phénomènes de corrosion de ces matériaux, des éprouvettes U-Bend ont été testées sur le site de Framatome au Creusot, dans des conditions d'essais similaires aux conditions de fonctionnement des GVs. Ces éprouvettes sont alors soumises à l'influence de trois paramètres : l'état physique de l'environnement à proximité des tubes (solide, liquide ou vapeur humide), la présence de polluants à base de plomb et de soufre à proximité des tubes (de nature PbO, $PbSO_4$, PbS, Na_2SO_4 et Na_2S) et le pH de l'environnement (4, 7.5 ou 9). Le rôle de tous ces paramètres dans le phénomène d'endommagement par corrosion sous contrainte des tubes de GV est étudié à l'aide de différentes méthodes de caractérisation, allant de la microscopie optique à la microscopie électronique à balayage (MEB), en passant par la microscopie électronique en transmission (MET) ou encore la spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS). Ces caractérisations permettront donc de proposer un modèle physico-chimique de l'effet du plomb et du soufre sur les mécanismes responsables de la dégradation par corrosion sous contrainte des tubes de GV.

Mots clés : alliage base nickel, tubes GV, corrosion sous contrainte, plomb, soufre.

SUJET DE LA THÈSE

Calcul de la force et du couple hydrodynamiques sur une particule solide glissante près d'une paroi solide glissante en présence d'un écoulement de cisaillement

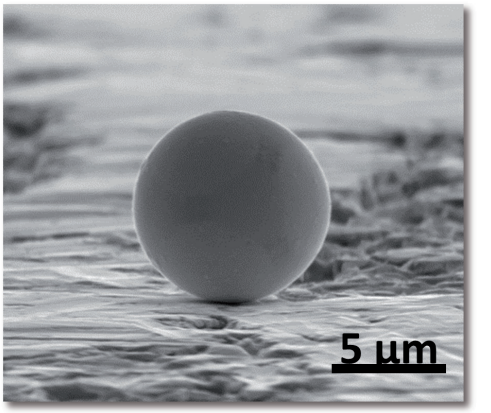
Doctorant :	Anis LOUCHAMI
Date du début de la thèse :	16 / 01 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SCA / LPMA
Référent IRSN de la thèse :	François GENSDARMES
Direction de thèse :	Antoine SELLIER / École Polytechnique
École doctorale :	Institut polytechnique de Paris - ED 626
Financement de la thèse :	IRSN

Ce sujet de thèse s'inscrit dans la problématique de la remise en suspension de poussières solides et microniques près d'une paroi solide sous l'action d'un écoulement en gaz raréfié. Cette problématique est rencontrée en particulier dans l'étude du scénario d'accident de perte de vide par entrée d'air dans le futur tokamak du réacteur de fusion ITER.

L'enjeu de la thèse et de procurer la force et le couple hydrodynamiques appliqués sur une particule solide glissante, immobile et de forme arbitraire dans le cadre des équations de Stokes et lorsque cette dernière est non seulement située au voisinage d'une paroi imperméable, plane et glissante, mais aussi plongée dans un écoulement extérieur unidirectionnel, parallèle à la paroi et de type cisaillement polynomial de degré deux. Cette force et ce couple sont à l'heure actuelle calculés sans condition de glissement et utilisés tels quels dans la modélisation de la remise en suspension, y compris pour les écoulements à basse pression, ce qui ne permet pas de faire des calculs réalistes de la mise en suspension pour le scénario type de LOVA (*Lost Of Vaccum Accident)*. On obtiendra ici la force et le couple en résolvant des équations intégrales sur la seule surface de la particule. Cela sera possible en utilisant le tenseur de Green (déjà disponible) du problème et son tenseur associé des contraintes (à calculer).

Dans les installations nucléaires, des particules solides de formes quelconques sont rencontrées mais, dans certains cas, comme celui de la production des poussières de tungstène dans un tokamak, des formes remarquablement proches de sphères sont observées (voir figure ci-dessous). Aussi, on examinera en priorité dans la thèse le cas de la particule sphérique. Le cas de quelques formes différentes sera aussi traité dans un second temps.

Mots clés : TOKAMAK, remise en suspension de poussières, particules,
force et couple hydrodynamiques, équations de Stokes, glissement de Navier.



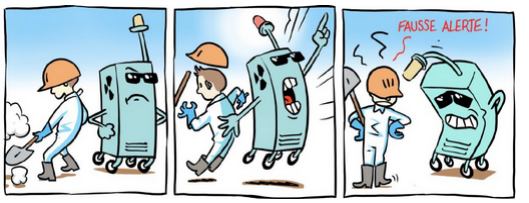
SUJET DE LA THÈSE

Modélisation des spectres alpha d'aérosols radioactifs et métrologie des données d'entrée par technologie des micro-capteurs aérosol – Application aux moniteurs de radioprotection utilisés dans des atmosphères atypiques par rapport aux référentiels normatifs IEC

Doctorant :	Mohamed Dahi M'HAYHAM
Date du début de la thèse :	03 / 01 / 2023
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SCA / LPMA
Référent IRSN de la thèse :	Gregoire DOUGNIAUX
Direction de thèse :	Xavier MOUGEOT / CEA Gif sur Yvette
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN

Dans les installations nucléaires, la radioprotection des travailleurs vis-à-vis de l'exposition aux aérosols radioactifs est assurée par des moniteurs de la contamination radioactive atmosphérique (CAM). Ces moniteurs prélèvent les aérosols ambiants sur filtre et mesurent en continu l'activité déposée. Utilisés dans des conditions atypiques, notamment d'empoussièrement, de fausses alarmes se déclenchent alertant d'une présence erronée de radioactivité alpha artificielle. Des études expérimentales ont montré que ces erreurs de mesure sont dues aux interactions entre les particules alpha émises par les aérosols radioactifs naturels (descendants du radon) et les aérosols non radioactifs causant une dégradation du spectre. Ces études ont également mis en évidence une corrélation entre la dégradation du spectre et la granulométrie des aérosols, permettant d'établir un facteur de correction empirique de la mesure de la radioactivité alpha artificielle, adapté au moniteur utilisé. Néanmoins, cette approche nécessite l'établissement d'une base de données expérimentales pour différentes masses et granulométries d'aérosols. Des modélisations validées par ces résultats expérimentaux permettraient de généraliser ces résultats pour tout type de granulométries, ainsi que comprendre toutes les interactions entre les différents aérosols. La première étape consiste à simuler des dépôts d'aérosols sur filtre à l'aide de codes spécifiques, notamment le code DALEC développé à l'IRSN. Cette structure géométrique sera ensuite intégrée au code Monte Carlo GEANT4 afin de simuler les spectres. Des méthodes d'inversion seront ensuite utilisées pour corriger les mesures en isolant la contribution des descendants du radon.

Par ailleurs, en situation réelle d'utilisation, une information fiable sur la granulométrie des aérosols prélevés par le moniteur peut être obtenue par des micro-capteurs. Ces instruments constituent une partie innovante de la chaîne de mesure car ils fournissent de nouvelles données au moniteur pour améliorer les mesures. Il est donc envisagé de développer une méthodologie spécifique afin de quantifier de manière métrologique leurs performances et leur influence sur les résultats de mesure.



Mots clés : aérosols radioactifs, radioactivité alpha, radioprotection, moniteur de contamination atmosphérique, dégradation du spectre, simulation Monte Carlo GEANT4, micro capteurs aérosol.

SUJET DE LA THÈSE

Étude expérimentale et numérique des écoulements et de la stratification des gaz lors d'un feu dans un local confiné et mécaniquement ventilé – Application aux scénarios d'incendie en milieu sous-oxygéné

Doctorant :	Loïc PERRIN
Date du début de la thèse :	01 / 09 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SA2I / LEF
Référent IRSN de la thèse :	Hugues PRETREL
Direction de thèse :	Olivier VAUQUELIN / AMU
École doctorale :	AMU - Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique - ED 353
Financement de la thèse :	IRSN & ENS Paris-Saclay

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des recherches menées sur le risque incendie dans les installations nucléaires. Les configurations expérimentales considèrent, dans un objectif de représentativité des scénarios, des environnements confinés et ventilés mécaniquement ainsi que des régimes de combustion sous-oxygénés. L'objectif est la compréhension et la description des écoulements régissant la stratification des gaz, l'alimentation en oxygène du foyer ainsi que les échanges de chaleur aux parois, en milieu sous-oxygéné. A terme, l'objectif est l'amélioration du potentiel prédictif des outils de simulation de l'IRSN pour des configurations complexes rencontrées lors d'un incendie en milieux sous-oxygénés. Ces derniers introduisent des couplages forts entre les différentes phénoménologies impliquées lors d'un incendie dans un compartiment (pyrolyse du matériau, zone de réaction, panache, écoulement au plafond, écoulements rampants, remplissage, alimentation en air vicié...). Les zones de mélange et de diffusion évoluant en régime pleinement ou faiblement turbulent sont nombreuses pour ces configurations mais souvent peu décrites dans la littérature, les outils de simulations, eux, permettent difficilement de prédire ces mécanismes.

Le travail de recherche sera effectué expérimentalement à échelle réduite dans le dispositif STYX du Laboratoire d'Expérimentation des Feux de l'IRSN afin de maîtriser la mise en place d'une métrologie avancée, non-intrusive et innovante, au vu de la configuration étudiée. En effet, en se basant sur les acquis du laboratoire dans ce type d'approche expérimentale, une Vélocimétrie laser par Image de Particule (PIV) sera déployée afin de caractériser le champ de vitesse, d'abord des écoulements de fumée (panache, écoulement sous plafond) puis des écoulements d'air frais en champ proche du foyer, réalisant ainsi des mesures inédites pour les incendies confinés. Un exemple de résultat est représenté en Figure 1. Plusieurs configurations concernant la position et la puissance du foyer ainsi que le taux de renouvellement seront étudiées afin de constituer la base d'une étude paramétrique. En parallèle, le sujet de recherche comprend la réalisation de simulations numériques à l'aide du logiciel CALIF3S-ISIS en mettant en œuvre des simulations aux grandes échelles (SGE) pour la modélisation de la turbulence. Cette approche permet d'appréhender certains mécanismes aérauliques largement présents dans les milieux sous-oxygénés.

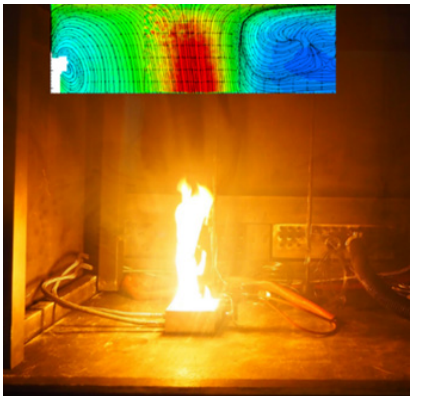


Figure 1 : Mesure du champ de vitesse au niveau du plafond d'une enceinte fermée dans le cas d'un feu de gaz (dispositif STYX).

Mots clés : incendie, sous ventilation, écoulement, expérimentation, simulation.

SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité des incertitudes sur les données nucléaires formalisées dans les matrices de covariance

Doctorant :	Pierre SOLÉ
Date du début de la thèse :	14 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SNC / LN
Référent IRSN de la thèse :	Sophie PIGNET
Direction de thèse :	Eric DUMONTEIL / CEA
École doctorale :	Paris-Saclay - Particules, Hadrons, Énergie et Noyau : Instrumentation, Imagerie, Cosmos Et Simulation (PHENIICS) - ED 576
Financement de la thèse :	IRSN & CEA

En support à ses missions d'expertise, l'IRSN dispose d'outils de simulation neutronique utilisés pour de nombreuses applications : la sûreté-criticité, la sûreté des réacteurs avec par exemple l'étude du comportement au niveau microscopique de la cuve sous irradiation.

Ces simulations neutroniques nécessitent en donnée d'entrée une caractérisation du milieu étudié au niveau atomique (comportement sous irradiation d'un isotope, décroissance radioactive...), c'est le rôle des **données nucléaires**. Ces données sont obtenues à partir de mesures expérimentales et de modèles théoriques. L'imprécision sur les données nucléaires constitue une importante source d'incertitude dans les simulations neutronique.

Ces **données nucléaires** auxquelles peuvent être associées des incertitudes, sont stockées dans des fichiers d'évaluations, évaluation par exemple d'une réaction neutron-noyau. L'ensemble de ces fichiers constitue une bibliothèque dont le contenu dépend des organisations les mettant à disposition de la communauté d'utilisateurs. L'extraction de ces données, tout comme le fait de les rendre exploitables par les codes de simulations forment en partie l'objet de ma thèse.

Les données d'incertitudes sont en partie encodées sous forme multi-groupe en énergie et portent sur les probabilités de réactions, l'anisotropie ou encore sur les résonances nucléaires. Actuellement ces données d'incertitudes sont propagées dans les simulations neutroniques pour rendre compte des biais de ces simulations dues aux données nucléaires, des biais qui doivent être couverts par des marges de sûreté.

Mon sujet de thèse s'intéresse à la fiabilité de ces incertitudes telles qu'elles sont formalisées aujourd'hui dans ces bibliothèques à travers des matrices de covariances, ce travail permettra d'améliorer nos outils de calculs en estimant plus précisément l'impact des incertitudes dues aux données nucléaires sur les résultats simulations. Dans un premier temps je développe un code capable de lire et mettre en forme ces matrices pour les rendre exploitables par les outils de simulation neutronique. La comparaison de ce travail avec d'autres codes au niveau international permet de s'interroger sur les différentes méthodes de reconstruction de ces données afin de les améliorer, par exemple avec un meilleur traitement des anisotropies, si importantes pour la fluence cuve. Par la suite, ces matrices de covariance seront utilisées pour estimer les biais et les incertitudes sur des grandeurs de sortie de simulations afin d'estimer précisément l'impact de ces améliorations sur des configurations d'étude.

Mots clés : données nucléaires, incertitudes, covariances.

SUJET DE LA THÈSE

Développement d'une approche de densité de probabilité de flammelettes pour la déflagration et comparaison avec la simulation des grandes échelles

Doctorant :	Dorian TRABICHET
Date du début de la thèse :	17 / 10 / 2022
Laboratoire IRSN :	PSN-RES / SA2I / LIE
Référent IRSN de la thèse :	Laura GASTALDO
Direction de thèse :	Denis VEYNANTE / École Centrale de Paris
École doctorale :	ED Sciences mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences / ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

L'IRSN s'intéresse, *via* son pôle sureté nucléaire, à l'étude des risques d'incendie et d'explosion dans les installations industrielles classiques et nucléaires. Pour cela, le laboratoire de l'incendie et des explosions (LIE) développe des solutions pour la simulation numérique de tels évènements. Parmi elles, le logiciel CALIF³S est dédié à la simulation des flammes de diffusion, correspondant à l'incendie, et des flammes de prémélange, correspondant aux explosions.

Dans un certain nombre de scenarii d'accident, les deux types de flammes turbulentes peuvent coexister. En cas de sous-oxygénation provoquée par le développement d'un feu, l'atmosphère, composée en partie de gaz imbrûlés et de suies, peut se ré-inflammer sous forme de déflagration à la suite d'un apport extérieur d'oxygène. Pour pouvoir simuler ce type de situations, un modèle de combustion commun doit être envisagé. La combustion se produit le long d'un front de flamme qui apparaît comme un enchevêtrement complexe de flammes laminaires de tailles caractéristiques inférieures, dites flammelettes. Une formulation du taux de réaction par une approche de densité de probabilité (PDF) de flammelettes, exploitant une structure pré-calculée de ces dernières, est en cours de développement pour l'incendie et sera étendue à l'explosion durant la thèse.

Le deuxième volet de la thèse concerne la modélisation de la turbulence. Deux approches sont disponibles dans le logiciel CALIF³S. L'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) est la plus utilisée compte-tenu des contraintes des applications industrielles. Bien qu'économique, cette méthode s'est révélée imprécise dans la prédiction de la vitesse de flamme. L'approche LES (*Large Eddy Simulation*) est plus prédictive mais plus coûteuse en temps de calcul et vient le plus souvent en soutien, à des fins de compréhension des phénomènes physiques et d'interprétation d'expériences.

Dans un souci de compromis entre bonne prédiction du modèle et temps de calcul modéré, une stratégie dite hybride intégrant dans un même système d'équations de bilan les approches RANS et LES sera développée au cours de cette thèse et implémentée dans le logiciel CALIF³S.

La première étape de la thèse a porté sur le développement des méthodes hybrides RANS/LES pour la déflagration. Une étude bibliographique a été réalisée. Parallèlement, la simulation avec une approche LES de différents cas d'accélération de flammes de prémélange a été effectuée grâce au supercalculateur IRENE du Très Grand Calculateur du CEA (TGCC). Les résultats obtenus seront utilisés comme référence pour la simulation de ces mêmes cas avec l'approche hybride.

Mots clés : explosion, méthode hybride LES/RANS, modèle de densité de probabilité de flammelettes.

PRÉSENTATION DE LA TABLE RONDE
MARDI 28 MARS
21 h 00 - 22 h 30 Salle 3 Fontaines

Place de l'IA dans la recherche

Si on a beaucoup entendu parler de l'IA ces derniers mois avec la mise à disposition de ChatGPT ou de Dall-e, l'intelligence artificielle prend une place de plus en plus importante dans la recherche et notre vie courante depuis quelques années déjà. On a pu ainsi entendre parler de résultats spectaculaires publiés récemment. Par exemple*, début octobre, une équipe chinoise a amélioré numériquement de dix fois la résolution d'images de microscopie optique en biologie. En mai, une équipe de Facebook a fait démontrer des théorèmes mathématiques par une IA. Le mois suivant, le concurrent Google a présenté un logiciel qui a résolu un tiers de 200 problèmes scientifiques de niveau licence en mathématiques, physique, économie, biologie.

A l'IRSN, comme dans tous les organismes de recherche de par le monde, l'IA est de plus en plus utilisée par les chercheurs tant en sûreté qu'en radioprotection. Il ne s'agit pas de remplacer le chercheur, mais de lui fournir des outils lui permettant d'être plus pertinent et efficace dans son travail. Les applications touchent par exemple à la propagation des incertitudes, au traitement du signal, à la reconnaissance des images, à l'analyse des données ou à la résolution de problèmes inverses. Des référents ont été nommés à la Direction Déléguée Développement numérique et aux systèmes d'information (D3NSI) et au pôle Sûreté nucléaire à l'IRSN, pour accompagner les porteurs de projets ayant une dimension d'intelligence artificielle. Et de plus en plus de chercheurs se forment à l'IA et l'utilisent dans leur quotidien, de manière appropriée et responsable.

Cette soirée débat permettra de faire un historique rapide du développement de l'intelligence artificielle dans la recherche. Puis quelques chercheurs de l'Institut témoigneront de leur expérience dans l'utilisation de ces techniques, qu'ils soient mathématiciens de formation ou chercheurs dans d'autres disciplines qui se sont formés à l'IA, et ce dans des applications de sûreté ou de radioprotection. Enfin seront évoqués les perspectives et espoirs donnés par cette nouvelle révolution technologique, ainsi que ses limites, notamment éthiques et déontologiques.

* Exemples tirés d'un article du Monde « L'intelligence artificielle, nouveau moteur de la recherche scientifique » du 24 / 10 / 22 par David Larousserie.

LA SOIRÉE DU JEUDI 30 MARS

Et si vous déposiez un brevet ?

Au cours de vos travaux de recherches, il est possible que vous fabriquiez un nouveau dispositif de mesure, que vous mettiez au point de nouvelles formulations chimiques ou développiez un procédé pour obtenir des mesures jusque-là inaccessibles.

Vos résultats peuvent être qualifiés d'invention et prétendre à être protégés par un brevet.

Qu'est-ce qu'une invention ?

L'invention est décrite comme une solution technique à un problème technique. Cette notion de technique peut être entendue de manière large. On peut ainsi breveter un produit (dispositif, médicament…), un procédé (s'il s'agit du procédé spécifique permettant d'obtenir un produit) ou une application (y compris une nouvelle application d'un produit).

Pour être brevetable, cette invention doit respecter trois critères : la nouveauté (pas de communication scientifique en amont du dépôt), « l'activité inventive » (l'invention ne doit pas être évidente au regard de l'état de la technique) et la susceptibilité d'application industrielle (les résultats peuvent être reproduits).

Certains résultats ne sont pas brevetables comme les logiciels, les méthodes mathématiques ou les races animales. Demandez-nous conseil.

Devenez inventeur !

Si vous mettez au point une invention, vous gagnez le statut d'inventeur et vous êtes cité comme tel dans le brevet. C'est un gage de capacité technique auprès de vos futurs employeurs et peut faire la différence sur un CV. De plus, un brevet est l'équivalent d'une seconde publication !

En tant qu'inventeur, vous percevez une rémunération supplémentaire sous forme de plusieurs primes : au dépôt de la demande de brevet, à la délivrance du brevet et à la commercialisation de l'invention.

Pour en savoir plus

Si vous avez besoin de compléments d'informations ou pensez que vos travaux de thèse aboutiront à une invention et que celle-ci pourrait faire l'objet d'une demande de brevet, n'hésitez pas à contacter le service de valorisation du SP³In par mail à l'adresse suivante ipiv@irsn.fr

Le SP³In pourra vous conseiller et prendre en charge les démarches de protection et de valorisation.

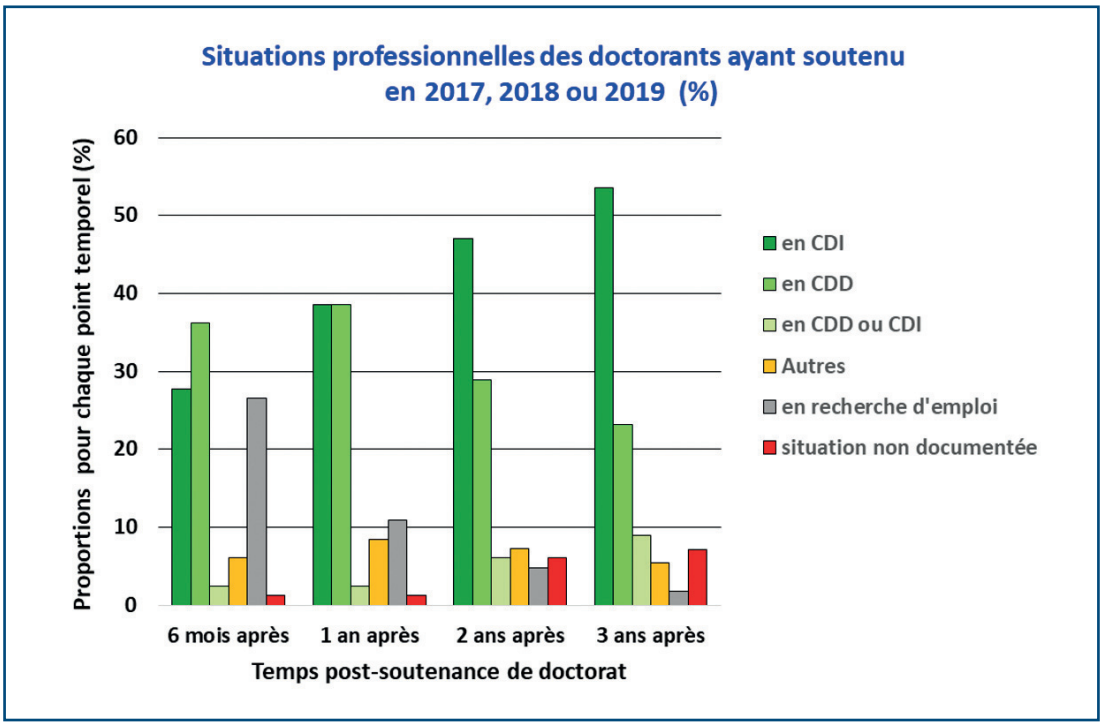
DEVENIR PROFESSIONNEL DES DOCTORANTS DE L'IRSN, GENERATIONS 2017 À 2019

IRÈNE SOROKINE-DURM (DST / SP³IN)

L'IRSN réalise annuellement, depuis près de 15 ans, une enquête interne pour connaître la situation professionnelle des docteurs issus de l'Institut.

Ainsi, une analyse précédente sur la période 2007 – 2015 indiquait que 60 % des docteurs issus de l'IRSN avaient trouvé un emploi dans les 3 mois suivant la soutenance de thèse. Trois ans après l'obtention du doctorat, moins de 5% des docteurs étaient en recherche d'emploi, à comparer aux diverses enquêtes statistiques françaises qui s'accordent sur des taux de chômage à 3 ans de l'ordre de 6- à 10%, données variant selon le type d'enquête [1] et selon les domaines scientifiques des doctorats.

La dernière analyse réalisée concerne les docteurs diplômés sur la période 2017 - 2019 (enquête arrêtée à mi-décembre 2021). Il en ressort que 6 mois après la date de soutenance de thèse, 2/3 des nouveaux docteurs (83 personnes concernées) ont un emploi, en Contrat à durée déterminée (CDD) ou indéterminée (CDI), avec néanmoins une majorité de CDD. Le ratio CDD vs. CDI s'équilibre dès 1 an post-soutenance et la différence au profit des CDI est bien nette à 2 ans après.



Trois ans après l'obtention du doctorat, 48 docteurs sur les 52 dont la situation est bien connue ont obtenu un CDD ou un CDI (situations non documentées exclues) et 1 seul docteur est en recherche d'emploi (1 autre est en stage de professionnalisation, 1 attend son affectation à l'Éducation nationale et enfin 1 est devenu agent immobilier indépendant). Cela représente un taux d'emploi contractualisé de 92 %, valeur comparable aux 91 % de taux d'emploi de l'enquête ministérielle, à 3 ans, pour les nouveaux diplômés de doctorat de 2014.

[1] CEREQ, MESRI / SIES, Adoc talent Management, etc.

Par ailleurs, l'employabilité des docteurs apparaît variable selon les disciplines. Le tableau ci-après illustre ce constat en répartissant la situation professionnelle à 1 an après soutenance de thèse des 83 docteurs de la période 2017-2019 selon l'Unité de recherche (UR) de l'IRSN à laquelle ils appartenaient lors de leur doctorat.

1 AN APRÈS SOUTENANCE (nombre de personnes)	UR ENVIRONNEMENT	UR RADIOPROTECTION HOMME	UR SÛRETE
En CDI	7	6	19
Déjà en CDI à l'IRSN	0	1	1
En CDD	11	7	14
En CDD ou CDI	1	0	1
Autres	2	3	2
En recherche d'emploi	6	0	3
Situation non documentée	0	1	0
TOTAUX	**27**	**18**	**40**

Ainsi, le meilleur score en termes d'emploi à 1 an est obtenu par l'UR « Sûreté » qui accueille des disciplines telles que les mathématiques, la physique, les sciences de l'ingénieur ou encore l'informatique. Cette tendance est cohérente avec celle affichée par l'édition 2021 de *L'état de l'Enseignement supérieur de la Recherche et de l'Innovation en France*[2] *d'obtention d'un CDI-à-1-an* supérieure pour les *Sciences et leurs interactions* (mathématiques, physique, sciences de l'ingénieur, informatique).

[2] https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR14_RESUME/l_etat_de_l_enseignement_superieur_de_la_recherche_et_de_l_innovation_resume/

Accéder à l'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Besoin de consulter des articles scientifiques, d'accéder à des ressources électroniques (ex: Scopus, Science direct,...).

Besoin d'une recherche bibliographique, d'une veille thématique ?

Besoin de commander un ouvrage ?

Retrouvez-vous sur le portail My IRSN !

MyIRSN/Mes outils et ressources/Management des connaissances/Ressources documentaires, abonnements et veilles

Vos contacts : myriam.dulor@irsn.fr , valerie.salmon@irsn.fr
et karen.payrar-aergon@irsn.fr
DTR / D2MC2 / SEARCH

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

JEUNES CHERCHEURS

Un accès facilité aux connaissances

Découvrez ASK

IRSN [ASK

ASK est le moteur de recherche IRSN qui indexe en « **EXPERTISE RECHERCHE** » :

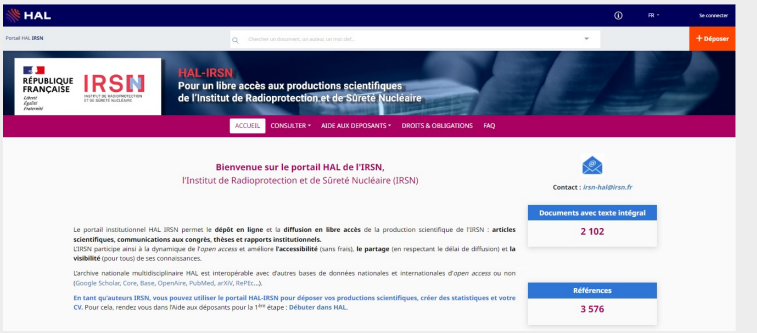
- les **documents d'expertise** dans les domaines de la sûreté des installations nucléaires de base françaises, de la santé-radioprotection, de la crise et de l'environnement produits par l'IRSN ;
- les **documents concernant la recherche** : les rapports scientifiques, les thèses, les publications et communications ;
- les **collections des ouvrages scientifiques IRSN** : sciences et techniques, documents de référence, ligne directrice, HDR ;
- les **descriptifs des boites d'archives IRSN**;
- le **retour d'expérience transverse** (Fiches REX, Rapports REX, la base de REX ARIA du BARPI);
- **les textes réglementaires et para réglementaires** relatifs aux activités du nucléaires.

Votre Contact : valerie.ganivet@irsn.fr

DTR / D2MC2 / SEARCH

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Diffuser en libre accès vos travaux scientifiques sur l'archive HAL-IRSN



https://hal-irsn.archives-ouvertes.fr/

« *OUVERT AUTANT QUE POSSIBLE ET FERMÉ QUE SI NÉCESSAIRE* »

Le « libre accès » (*open access*) vise à garantir un accès numérique gratuit, immédiat et permanent aux publications et aux données associées, sans barrière technique ni juridique.

OPEN ACCESS

En tant que doctorants, vous devez référencer vos articles scientifiques et communications à congrès, accompagnés, autant que possible, des textes intégraux (ou poster ou power point) sur l'archive HAL-IRSN.

Le diffusion en libre accès de vos travaux scientifiques permet d'augmenter votre visibilité numérique et de rendre la science accessible à tous.

Pour les formations et toutes questions : irsn-hal@irsn.fr
DTR / D2MC2 / SEARCH

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

JEUNES CHERCHEURS

Découvrez vos archives

Toute la connaissance passée de l'Institut pour vous aider à construire l'avenir

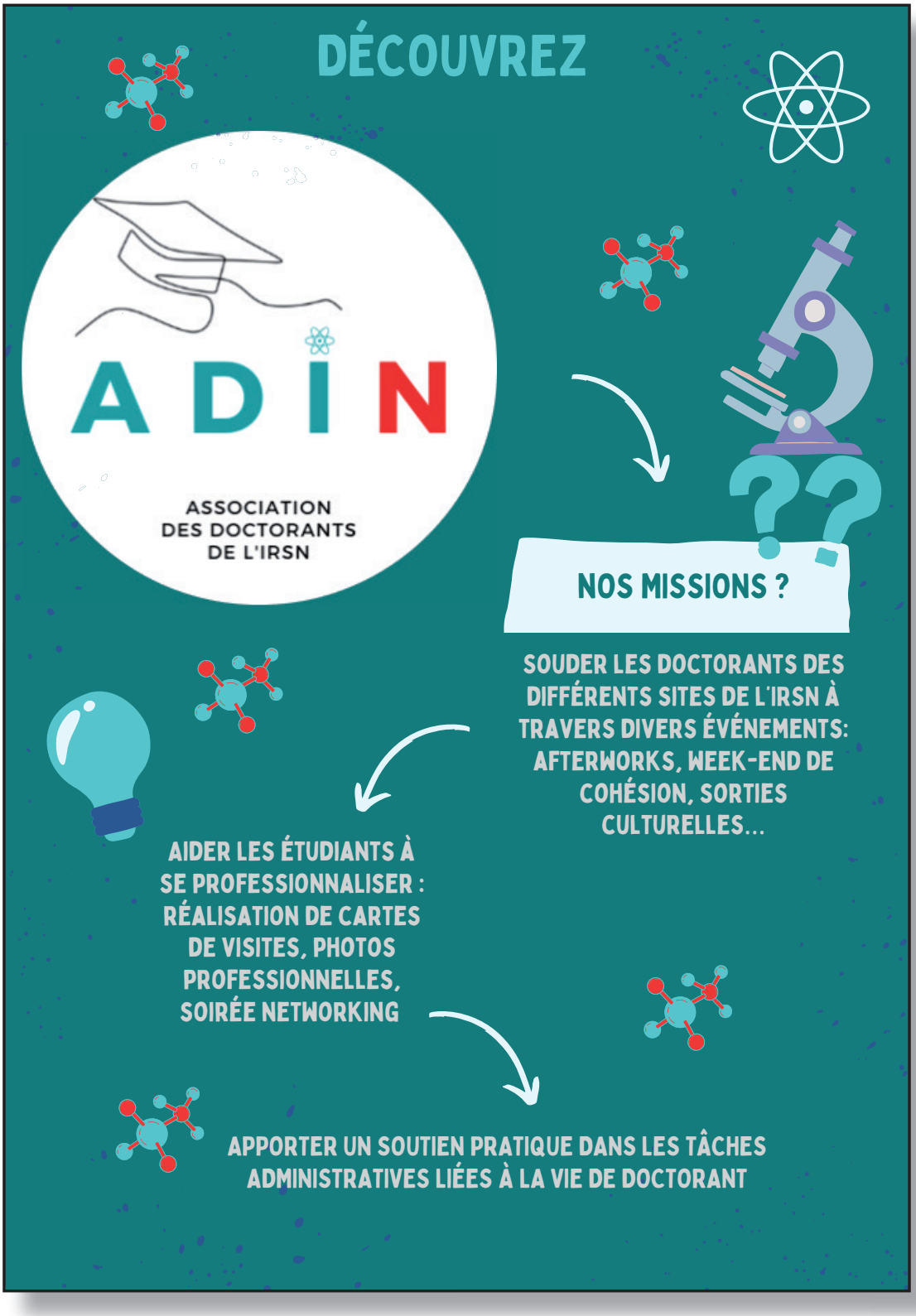
Nous conservons sur nos sites les archives de l'IRSN ainsi que de ses prédécesseurs (SCPRI, OPRI, IPSN). Ce fonds unique regorge de connaissances inédites qui attendent encore d'être découvertes.

Rendez-vous sur SPARK Archives ou via **ASK** pour rechercher et accéder aux archives de l'IRSN ou contactez les archivistes !

Votre contact : camille.bouchain@irsn.fr

DTR / D2MC2 / SEARCH

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE


DÉCOUVREZ
ADIN
ASSOCIATION
DES DOCTORANTS
DE L'IRSN
NOS MISSIONS ?
SOUDER LES DOCTORANTS DES DIFFÉRENTS SITES DE L'IRSN À TRAVERS DIVERS ÉVÉNEMENTS: AFTERWORKS, WEEK-END DE COHÉSION, SORTIES CULTURELLES...
AIDER LES ÉTUDIANTS À SE PROFESSIONNALISER : RÉALISATION DE CARTES DE VISITES, PHOTOS PROFESSIONNELLES, SOIRÉE NETWORKING
APPORTER UN SOUTIEN PRATIQUE DANS LES TÂCHES ADMINISTRATIVES LIÉES À LA VIE DE DOCTORANT

COMMENT NOUS REJOINDRE ?

Envoyez nous un mail à ADIN@irsn.fr pour recevoir le formulaire d'inscription. C'est gratuit !

PRÉSIDENT

Quentin TALLON

VICE-PRÉSIDENTE

Sarah BRAGA-COHEN

TRÉSORIER

Théo FRECHARD

TRÉSORIÈRE ADJOINTE

Anne-laure POULIET

SECRÉTAIRE

Manon GUILLOU

SECRÉTAIRE ADJOINT

Florian SALIOU

RESPONSABLE ÉVÈNEMENT

Arthur THOMAS-JOYEUX

RESPONSABLE COMMUNICATION

Claire LAGO

RESPONSABLE COMMUNICATION

Sarmini BAVANANTHAN

RESPONSABLE ÉVÈNEMENT

Enya MOBIO

SECRÉTAIRE ADJOINT

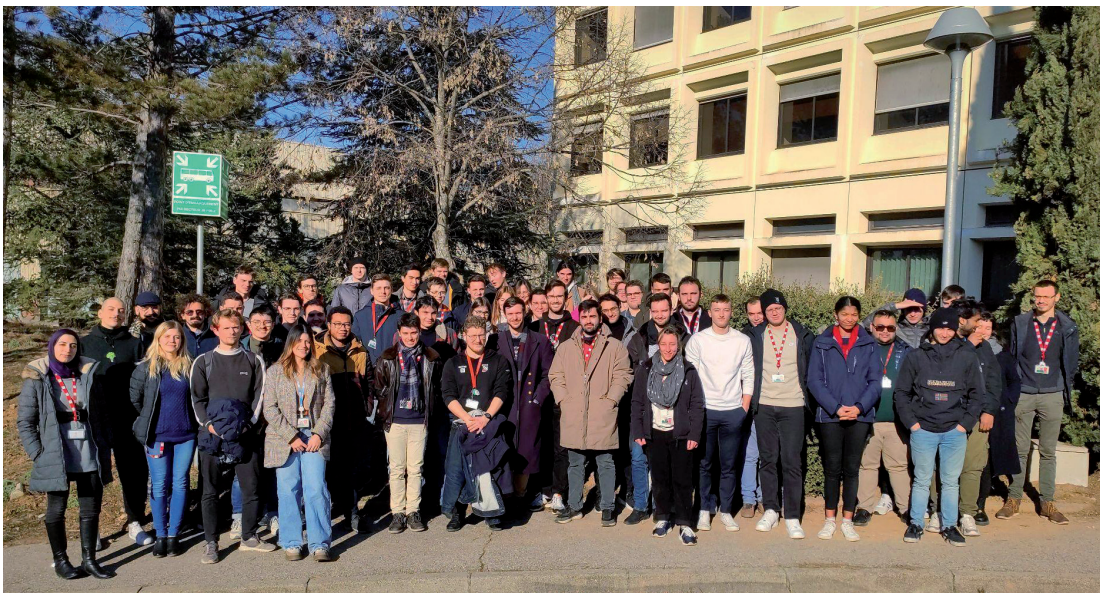
Apou-martial KPEMOU

SECRÉTAIRE

Diane QUEVAUVILLERS

L'Association des Thésards de Cadarache (ASTHEC) a pour objectif de réunir les étudiants, doctorants, post-docs, alternants, apprentis et stagiaires venant des quatres coins du centre du CEA de Cadarache.

Plusieurs évènements sont réalisés durant l'année par un bureau composé à 100 % de doctorants du centre : afterworks, activités extérieures, sorties mondaines, jeux de sociétés, visites d'installations, repas ou encore week-end d'intégration. Joignez-vous à nous afin de profiter de différentes activités et de rencontrer les autres membres du centre de Cadarache !



Visite du tokamak WEST (30/01/2023)

Pour toute demande d'information, n'hésitez pas à prendre contact avec nous en adressant un mail à : asthec.bureau@gmail.com

Rejoignez-nous sur les réseaux sociaux :

- Instagram : https://www.instagram.com/asthec_cad/
- Facebook : https://fr-fr.facebook.com/groups/asthec/?mibextid=6NoCDW

En espérant vous rencontrer très bientôt !

LISTE DES SERVICES ET LABORATOIRES D'APPARTENANCE DES DOCTORANTS

PDS : Pôle Défense Sécurité et non-prolifération

PDS-DEND : Direction de l'expertise nucléaire de défense et de sécurité

PDS-DEND / SESN : Service d'études en sécurité nucléaire

BMAX : Bureau d'étude et de modélisation des effets des armes et explosifs

PSN : Pôle Sûreté Nucléaire

PSN-RES : Direction de la recherche en sûreté

PSN-RES / SEREX : Service d'Étude et de Recherche Expérimentale

L2EC : Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie

LE2M : Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux

PSN-RES / SAM : Service des Accidents Majeurs

LEPC : Laboratoire d'étude de la physique du corium

LETR : Laboratoire d'étude du corium et du transfert des radioéléments

BEAM : Bureau d'études des accidents majeurs

PSN-RES / SCA : Service du Confinement et de l'Aérodispersion des polluants

LECEV : Laboratoire d'expérimentations en confinement, épuration et ventilation

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

LPMA : Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

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

LEF : Laboratoire d'expérimentation des feux

LIE : Laboratoire de l'incendie et des explosions

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

LSMA : Laboratoire de statistique et des méthodes avancées

LEMC : Laboratoire d'étude et de modélisation du combustible

PSN-RES / SNC : Service de Neutronique et des risques de Criticité

LN : Laboratoire de neutronique

PSN-EXP : Direction de l'expertise de sûreté

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

LMAPS : Laboratoire de modélisation et d'analyse de la performance des structures

PSN-EXP / SHOT : Service Homme Organisation Technologie

LSHS : Laboratoire de sciences humaines et sociales

... / ...

PSE : Pôle Santé Environnement

PSE-SANTE : Direction de la Santé

PSE-SANTE / SDOS : Service de Dosimétrie
- **LDRI :** Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants
- **LEDI :** Laboratoire d'évaluation de la dose interne
- **LMDN :** Laboratoire de micro-irradiation, de métrologie et de dosimétrie neutrons

PSE-SANTE / SERAMED : Service de Recherche en Radiobiologie et en Médecine régénérative
- **LRMed :** Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales
- **LRAcc :** Laboratoire de Radiobiologie des expositions accidentelles

PSE-SANTE / SESANE : Service de Recherche sur les Effets Biologiques et Sanitaires des rayonnements ionisants
- **LEPID :** Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants
- **LRTOX :** Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale
- **LRSI :** Laboratoire de recherche en Radiochimie, Spéciation et Imagerie

PSE-SANTE / SESUC : Service des Situations d'Urgence et d'Organisation de Crise
- **BMCA :** Bureau de modélisation des transferts dans l'environnement pour l'étude des conséquences des accidents

PSE-ENV : Direction de l'Environnement

PSE-ENV / SAME : Service d'Analyses et de Métrologie de l'Environnement
- **LMRE :** Laboratoire de métrologie de la radioactivité dans l'environnement
- **LERCA :** Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique

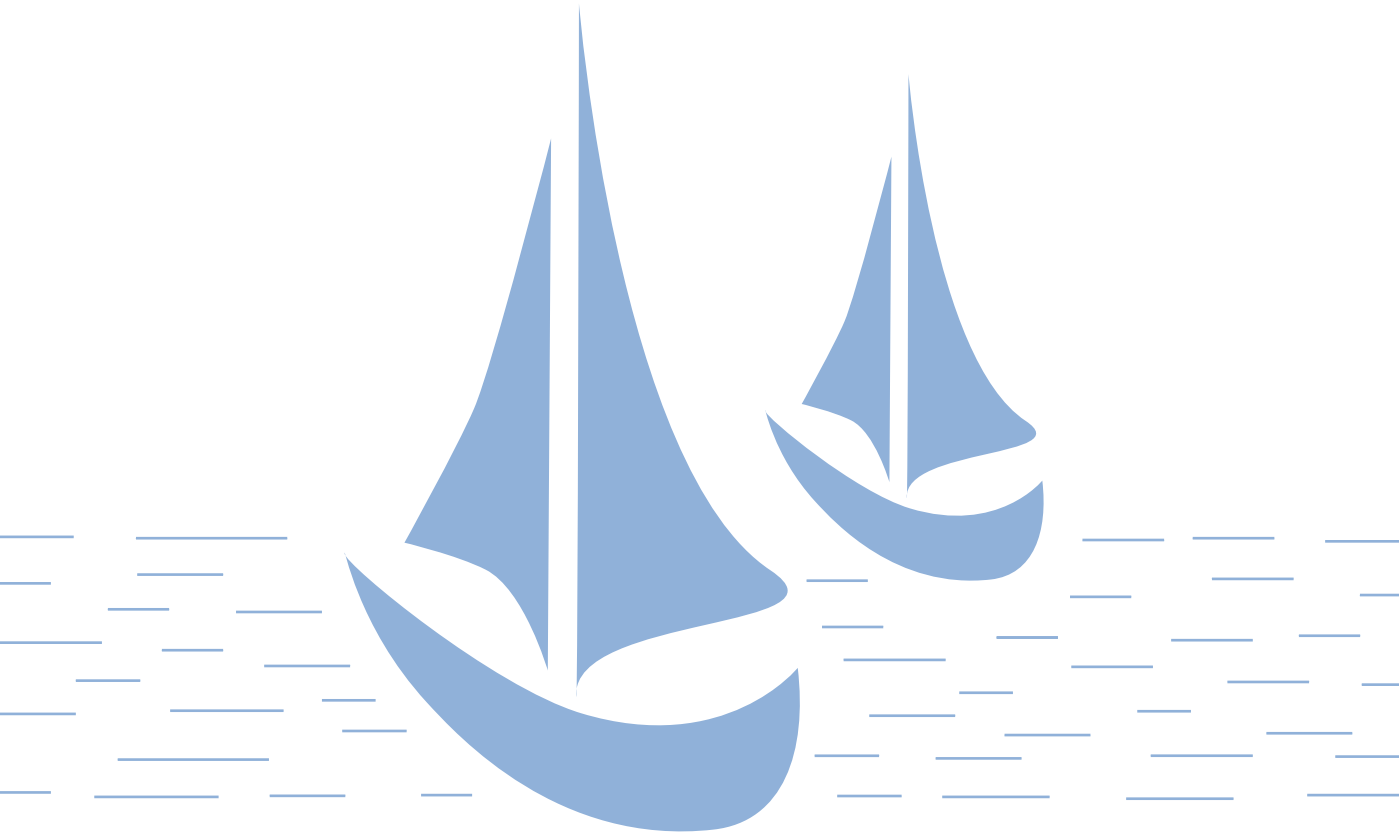
PSE-ENV / SCAN : Service de Caractérisation des sites et des Aléas Naturels
- **BEHRIG :** Bureau d'expertise en hydrogéologie et sur les risques d'inondation et géotechniques
- **BERSSIN :** Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations

PSE-ENV / SEDRE : Service des Déchets Radioactifs et des transferts dans la géosphère
- **LETIS :** Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sous-sols
- **LELI :** Laboratoire de recherche sur le devenir des pollutions de sites radioactifs
- **UEMIS :** Unité d'expertise et de modélisation des installations de stockage

PSE-ENV / SRTE : Service de Recherche sur les Transferts et les Effets des radionucléides sur les écosystèmes
- **LECO :** Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides
- **LR2T :** Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes terrestres
- **LRC :** Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville
- **LRTA :** Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques

Les Journées des thèses sont organisées par la Direction de la stratégie (DST).

Réalisation du livret 2023 : Serge Dreuil et Sandrine Marano [IRSN]. Véronique Laget 06 64 30 99 72, Maquettiste.



IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31, avenue de la Division Leclerc
92260 - Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre 546 018
Référence : DST/SP³In/2023-00031
COURRIER
BP.17 - 92262 Fontenay-aux-roses
Cedex

TÉLÉPHONE
+33 (0)1 58 35 88 88
SITE INTERNET
www.irsn.fr
E-MAIL
contact@irsn.fr
@irsn france

afaq ISO 9001 Qualité AFNOR CERTIFICATION