

IRESNE 2024
SUJETS
DE THÈSES



iresne@cea.fr
04 42 25 20 71

Institut IRESNE
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lès-Durance

Sommaire

Présentation de l'IRESNE	6	Etude et quantification des propriétés optiques du combustible nucléaire : vers une meilleure connaissance de l'interaction laser/matière	24
IRESNE : Un institut du CEA à Cadarache	8	Exploration des capacités des méthodes Hybrid High Order en raffinement adaptatif de maillage et transition endommagement/rupture pour la simulation de la fissuration	25
Les thèses à l'IRESNE en pratique	10	Fabrication d'un combustible UO ₂ à partir de granulés : étude de l'influence des caractéristiques des granulés sur la microstructure et les propriétés du combustible	26
Département d'Etudes du Combustible	12	Génération assistée de noyaux de calculs complexes en mécanique du solide	27
Algorithmes de couplages multiphysiques pour solveurs en boîte noire dans un environnement HPC	13	Implémentation d'algorithmes parallèles sur GPU pour les simulations du combustible nucléaire sur supercalculateurs exaflopiques	28
Application de la fabrication additive pour la réalisation de combustibles nucléaires innovants en UO ₂	14	Métamodèle de la fragmentation pour la simulation du procédé de broyage de poudres	29
Application de méthodes d'intelligence artificielle générative à la modélisation à l'échelle atomique des matériaux du nucléaire	15	Modèle multi-fidélité pour la description des propriétés thermophysiques d'oxydes mixtes d'actinides, combustibles nucléaires des réacteurs à neutrons rapides	30
Calcul à l'échelle atomique de propriétés structurales et thermodynamiques pour l'amélioration des diagrammes de phase d'oxydes d'actinides contenant des actinides mineurs	16	Modélisation et simulation du procédé de calandrage des électrodes Li-ion par méthode des éléments discrets	31
Calcul de la conductivité thermique des combustibles UO ₂ et de l'influence des défauts d'irradiation	17	Modélisation multi-échelle de la restructuration du combustible UO ₂ pour des réacteurs nucléaires calogènes de petite puissance (SMR) fonctionnant à basse température	32
Comportement thermomécanique d'un lit de particules immergées à grande polydispersité : comparaison entre expérience et simulation	18	Modélisation par champ de phase du transport de la porosité à l'échelle microscopique par évaporation/condensation dans le combustible MOX d'un réacteur nucléaire	33
Compréhension et modélisation du transport des gaz dans un combustible UO ₂ présentant plusieurs familles de porosités	19	Quel couplage thermomécanique pour prédire la fragmentation du combustible nucléaire ?	34
Développement d'un capteur logiciel pour le procédé de mélange-broyage du combustible	20	Rôle des propriétés de surface des particules de poudres UO ₂ sur leur aptitude à l'agglomération et leur comportement rhéologique	35
Etude des phénomènes de restructuration dans le combustible UO ₂ par des techniques de diffraction des électrons en haute résolution	21	Simulation multiéchelle de l'impact de la montée des dislocations sur le comportement mécanique de l'UO ₂ à haute température	36
Etude des transitions de phases dans les oxydes mixtes sous-stœchiométriques à base d'uranium	22	Vers une meilleure connaissance du rôle de la microstructure sur les propriétés thermiques des combustibles nucléaires pour réacteurs de recherche	37
Etude du pressage de poudres UO ₂ en vue de la validation expérimentale d'une modélisation par éléments finis	23	Vers une pastille de combustible nucléaire optimisée pour résister aux gradients de température	38

Département d'Etudes des réacteurs

39

Analyse dimensionnelle pilotée par les données pour la conception de systèmes passifs de sûreté nucléaire 40

Analyse et simulation thermohydraulique multi-échelles des transitoires dimensionnants d'un concept innovant de réacteur nucléaire calogène 41

Conception et réalisation d'un détecteur neutronique optique fonctionnant à haute température. Application à un programme expérimental dans le réacteur JOYO 42

Description théorique de la fission des noyaux impairs et impairs-impairs par la méthode TDGCM 43

Développement d'indicateurs de similarité pour la validation neutronique. Application aux réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb 44

Développement d'une méthode de propagation d'incertitudes dans une modélisation couplée neutronique-thermohydraulique de cœurs de réacteurs à plaques 45

Développement d'une méthode de propagation d'incertitudes de type fonctionnel sur la puissance résiduelle 46

Développement de méthodes d'optimisation avancées pour les scénarios électronucléaires 47

Développement d'une approche globale de validation des codes de neutronique basée sur l'inférence bayésienne et les techniques de Machine Learning 48

Dynamique d'un cycle à vapeur surchauffée pour la cogénération électricité-chaleur avec service réseau analyse de stabilité et pilotage de la flexibilité 49

Etude et utilisation de verres à l'uranium pour la détection des neutrons par voie optique 50

Etude expérimentale des phénomènes physiques dans une chambre à fission 51

Implications d'une gestion par lots du combustible de réacteurs nucléaires à sels fondus 52

Mesures des corrélations entre observables de fission pour contraindre les modèles de désexcitation des fragments de fission 53

Modélisation des sections efficaces nucléaires ab-initio combinant théorie de la matrice R et fonctions de Green auto-cohérentes 54

Multiplicité de neutrons prompts de fission dans le domaine des résonances résolues du Plutonium 239 55

Simulation Monte Carlo de la fonction de transfert d'un réacteur nucléaire pour l'exploitation de mesures de bruit neutronique 56

Simulations multiphysiques avec estimation d'incertitudes appliquées aux réacteurs rapides refroidis au sodium 57

Simulations thermohydrauliques d'écoulements turbulents par la méthode de la frontière immergée pour des dispositifs de sûreté innovants de réacteurs nucléaires 58

Département de Technologie Nucléaire 59

Assimilation de données transitoires et calibration de codes de simulation à partir de séries temporelles 60

Calculs et expériences portant sur des écoulements MHD de métal liquide application aux pompes électromagnétiques pour la filière sodium 61

Caractérisation des vortex à la surface d'une maquette représentative d'un réacteur de 4e génération 62

Contribution expérimentale et numérique à la caractérisation des transferts de chaleur dans un échangeur TPMS – application aux échangeurs intermédiaires d'un réacteur à sel fondu 63

Décomposition de domaine multi-bloc et non conforme, adaptée au couplage aux frontières 'exact' du code de thermohydraulique SIMMER-V 64

Dispersion transverse de polluants dans une rivière de piedmont présentant une alternance de rades-mouilles : application à la moyenne Durance 65

Étude d'un procédé de lavage innovant pour le traitement de composants sodés issus d'installations utilisant du sodium liquide comme caloporteur 66

Etude des scintillateurs plastiques pour les mesures neutroniques passive et active 67

Investigation expérimentale, modélisation et impact de propriétés thermophysiques du corium en situation d'accident grave d'un réacteur nucléaire 68

Modélisation et simulation d'ébullition sous haut flux en sodium 69

Modélisation et simulation numérique des écoulements hydrodynamiques compressibles multimatériaux et multiphasés pour la simulation de l'interaction Corium-Sodium 70

Simulation numérique de particules entraînées par convection naturelle multiphasique. Application aux accidents graves des réacteurs nucléaires de 4ème génération 71

Utilisation de méthodes bayésiennes pour la localisation de matière nucléaire en milieu hétérogène par interrogation photonique active 72

Présentation de l'IRESNE

**Institut de recherche
sur les systèmes
nucléaires pour la
production d'énergie
bas carbone**

L'IRESNE est l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone. Créé le 1er février 2020 par le CEA, l'IRESNE rassemble une équipe de 900 collaborateurs qui conçoivent, simulent, testent et qualifient les réacteurs nucléaires actuels et de demain.

L'IRESNE ouvre également son champ de recherches à l'intégration des systèmes nucléaires dans le mix énergétique bas carbone. Le nucléaire, au-delà de la production d'électricité, est une source de production de chaleur.

Ce sont les innovations technologiques en soutien à ces deux composantes, électricité et chaleur, que l'institut approfondit dans ses recherches. L'objectif de cette optimisation est d'offrir à la société un mix énergétique puisant dans toutes les ressources bas carbone.

La création de l'institut s'inscrit dans la mise en place, au sein du CEA, d'une organisation dédiée aux études sur les énergies décarbonées. Cette organisation répond à la volonté du gouvernement français de créer un mix énergétique décarboné qui s'appuie sur l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Les objectifs sont fixés par l'Etat dans le cadre de la loi de transition énergétique pour une croissance verte et les lois de Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE). Ces lois assurent la déclinaison de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), feuille de route de la France pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre. La SNBC concerne tous les secteurs d'activités et doit être portée par tous : citoyens, collectivités, entreprises.

Ainsi, le CEA a créé une Direction des énergies (DES) dans laquelle s'intègre l'institut IRESNE. La Direction des énergies regroupe également un Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone (ISAS) et un Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (ISEC).



LISM : Capteur utilisé pour les mesures de tomographie électrique dans un conduit basse pression et basse température. Ce capteur comprend un anneau de 32 électrodes dont la surface est tangente à la paroi interne du conduit. La tomographie électrique consiste en une série d'excitations électriques sur des ensembles d'électrodes. Cette technique est ainsi non intrusive dans l'écoulement.

IRESNE : Un institut du CEA à Cadarache

Installé en région Provence Alpes Côte d'Azur, sur la commune de Saint-Paul lez Durance, le centre CEA-Cadarache est au cœur de la transition énergétique avec ses instituts de recherche et plateformes expérimentales dans le domaine des énergies bas-carbone : énergie nucléaire (fission, fusion), bioénergies et énergies solaires.

A ces recherches s'ajoutent les activités relatives à la propulsion nucléaire pour la Marine nationale, la recherche fondamentale en biosciences et biotechnologies, les études sur le démantèlement et l'assainissement des installations nucléaires et sur la sûreté nucléaire. Trois instituts contribuent activement aux recherches menées à Cadarache.

L'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (CEA-Iresne) de la direction des énergies du CEA a pour missions la recherche et le développement d'innovations dans le domaine de l'énergie nucléaire de fission (réacteurs et combustibles nucléaires notamment) intégrée à un mix énergétique bas carbone.

L'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (CEA-Irfm), travaille sur la fusion, source d'énergie potentielle pour le futur. L'institut exploite, avec ses partenaires internationaux, le tokamak WEST pour préparer les expérimentations à venir sur le réacteur thermonucléaire expérimental international ITER.

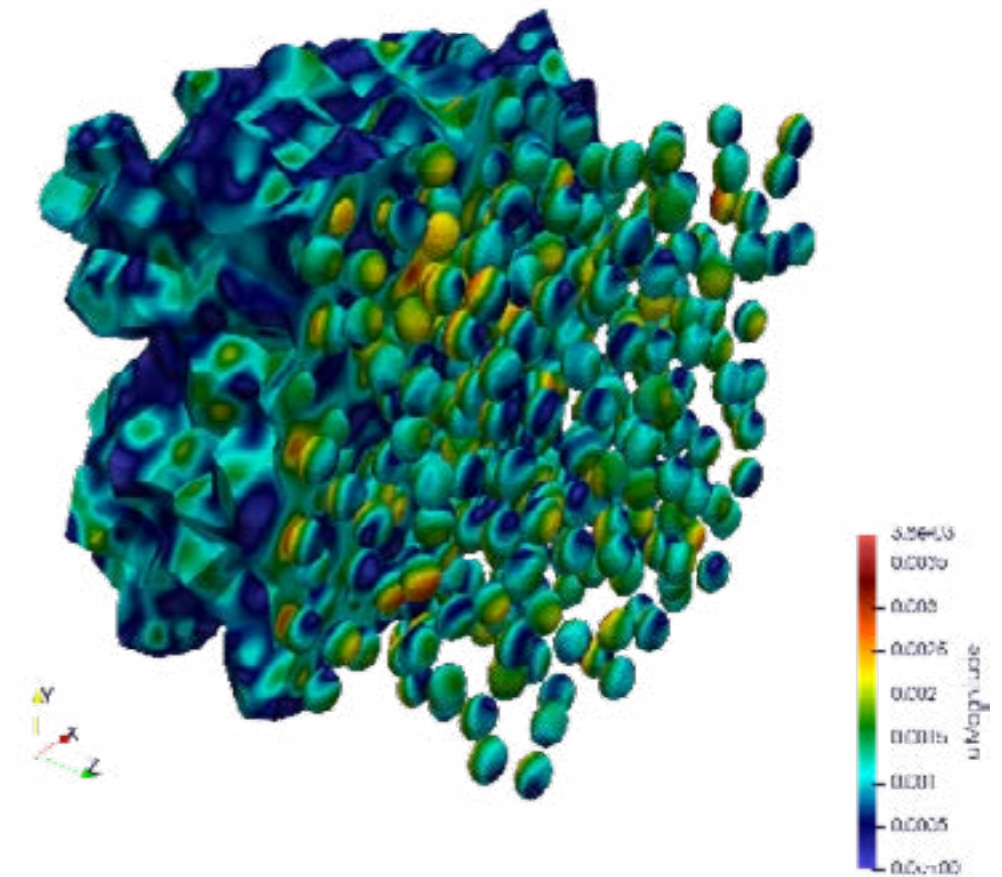
L'Institut de biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille (BIAM) explore deux thèmes : les mécanismes de réponses du vivant (plantes, algues, bactéries) face aux contraintes environnementales et ceux de la bioconversion de l'énergie produisant des molécules à forte teneur énergétique.

Le CEA-Cadarache rassemble 2 400 collaborateurs et accueille des installations de recherche de renommée internationale : le Réacteur Jules Horowitz (RJH) en construction, le tokamak WEST/Tore-Supra, banc de test pour Iter, ou encore la Cité des Energies.

Les sujets de stages présentés dans ce livret sont proposés par l'IRESNE, tous en liens avec des défis scientifiques et technologiques à relever par l'Institut. Comme indiqué sur certains sujets, il peut être envisagé de poursuivre en thèse à l'issue du stage.

La notoriété internationale de ses chercheurs, la qualité scientifique des études menées, associées au caractère unique des plateformes numériques et expérimentales des laboratoires du Centre de recherche de Cadarache, offrent au futur stagiaire un environnement de travail de premier plan pour la réussite de son stage. Il pourra ainsi développer des compétences de haut niveau valorisables pour son évolution professionnelle.

Retrouvez toutes les offres de stages du CEA de Cadarache sur : <https://www.emploi.cea.fr>



© CEA

Simulation du Volume Élémentaire Représentatif (VER) d'un combustible d'oxyde mixte réalisée sur les supercalculateurs avec l'un des solveurs thermo-mécanique développé au CEA nommée MFEM-MGIS

Les thèses à l'IRENE en pratique

Choisir de faire sa thèse à l'IRENE, sur le centre CEA de Cadarache, c'est aussi faire le choix d'une qualité de vie de haut niveau. Les 120 doctorants de Cadarache ont un contrat de travail CEA de 3 ans avec un salaire brut mensuel de 2 135 €.

Ils peuvent bénéficier de la formation professionnelle qui permet de compléter leur formation initiale par des formations scientifiques en lien avec leurs travaux de thèse, des formations spécifiques pour mener à bien leur thèse (conduite de projet scientifique) ou encore gérer leur insertion professionnelle (réussir son projet professionnel, réussir ses entretiens de recrutement, ...).

Les travaux réalisés par le doctorant sont valorisés par des publications dans des journaux scientifiques internationaux et par des présentations lors de conférences nationales ou internationales permettant au doctorant de recueillir l'avis de ses pairs et de prendre sa place dans les communautés scientifiques. Les doctorants peuvent également se construire un réseau relationnel professionnel à travers les collaborations mises en place dans le cadre des thèses : collaborations en interne CEA, collaborations avec des universités ou d'autres organismes de recherche français ou étrangers ou avec des partenaires industriels.

Sur le plan associatif, les doctorants du CEA de Cadarache ont accès à l'Association des Thésards de Cadarache (ASTHEC), une association loi 1901 gérée pour et par ses membres. Elle est ouverte à tous les doctorants, stagiaires, post-doctorants et intérimaires accueillis dans les laboratoires du Centre CEA de Cadarache. Le but premier de l'Association est d'accueillir les nouveaux arrivants sur le Centre et de les faire se rencontrer via des activités diverses, à vocation scientifique ou non, se déroulant toujours dans une chaleureuse ambiance (soirées, sorties, visites scientifiques, transmission d'offres d'emplois). Pour plus d'informations : <https://www.facebook.com/groups/asthec/>

Le centre de Cadarache est également doté de nombreuses associations sportives et culturelles ouvertes aux doctorants. Le Centre de recherche de Cadarache, implanté sur la commune de Saint-Paul-Lez-Durance (Bouches-du-Rhône), est idéalement situé, à 30 min d'Aix-en-Provence, 1 h de la mer, 1 h 30 des stations de ski les plus proches. Il s'étend sur un grand parc arboré de 5 hectares où de nombreuses espèces animales vivent en liberté.

Un large choix de logements dans les 4 départements environnants s'offre aux doctorants : pour les plus citadins, les villes d'Aix en Provence (30 minutes par l'autoroute), Pertuis (20 minutes par la route), Manosque (10 minutes par l'autoroute) ; pour les amateurs de campagne, les villages du Luberon, du Var, des Alpes de Haute Provence, ... Le Centre de Cadarache est desservi matin et soir par des cars au départ de plusieurs villes et villages des départements 04, 13, 83 et 84. Ces cars sont gratuits pour les personnes venant travailler sur le Centre. Deux restaurants d'entreprise sont à disposition avec un tarif préférentiel pour les doctorants.

Plateforme MADERE - Manipulation du dosimètre sur la balance de précision. La plateforme MADERE réalise des mesures fines de spectrométrie gamma /X permettant de caractériser le vieillissement des aciers sous irradiation et d'anticiper leur fragilisation ainsi que d'améliorer les performances des codes de simulation neutronique

© A.Aubert /CEA



Département d'Etudes du Combustible



Le Département d'Études des Combustibles (DEC) mène une activité centrée autour du combustible nucléaire dans l'objectif d'accroître les performances et la sûreté des réacteurs actuels (générations 2 & 3) et de développer les combustibles nucléaires des réacteurs du futur (4ème génération). Il a pour mission d'acquérir, d'intégrer et capitaliser les connaissances relatives à la conception, à la fabrication, à la caractérisation et à l'étude du comportement des éléments combustibles nucléaires en réacteur. Les activités du DEC associent simulation numérique/modélisation et expérimentation.

Le DEC est structuré en trois services :

- le Service d'Analyses, d'Élaboration, d'Expérimentation et d'Examens des combustibles (SA3E),
- le Service d'Études et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC),
- le Service d'Exploitation et de Traitements des Combustibles (SETC).

© A.Aubert|CEA



© CEA

Algorithmes de couplages multiphysiques pour solveurs en boîte noire dans un environnement HPC

DEC/SESC/LMCP

Ce sujet est proposé dans le cadre du programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) NumPEX (Numérique Pour l'Exascale).

Il est intégré dans le Projet Ciblé Exa-MA (Méthodes et Algorithmes pour l'Exascale) et est proposé par des chercheurs du CEA et de l'Inria. Il s'inscrit dans un workpackage dédié aux méthodes de discrétisation et vise à la construction de méthodes numériques efficaces pour la résolution de problèmes multiphysiques, c'est-à-dire des problèmes dans lesquels différentes physiques interagissent.

La simulation numérique de phénomènes impliquant différentes physiques peut se faire soit en adoptant une approche monolithique ou partitionnée.

L'approche monolithique consiste à représenter les différentes physiques via la résolution d'un unique système matriciel contenant toutes les inconnues. Ce système est souvent mal conditionné et nécessite des techniques adaptées pour être résolu. Par ailleurs, il est aussi important de noter que le système algébrique à résoudre est souvent de grande taille, pouvant atteindre, voire dépasser, les capacités maximales des solveurs actuels.

L'approche partitionnée consiste à s'appuyer sur

des solveurs efficaces déjà développés et adaptés à chacune des physiques considérée séparément. La difficulté réside alors dans le couplage de ces différents solveurs pour obtenir la solution multiphysique.

L'objet de ce sujet de thèse est de proposer une méthode numérique efficace et générique pour coupler différents solveurs physiques utilisés en boîte noire. Il faut de plus que cette approche permette de passer à l'échelle Exascale.

La pertinence et la généralité de l'approche développée sera vérifiée sur des couplages électromagnétisme/acoustique/sismique et aussi thermo/mécanique. Par ailleurs, l'efficacité de la méthode numérique sera comparée à celle d'une approche monolithique considérée comme approche référence mais incluant des modélisations physiques souvent dégradées. Des validations expérimentales seront également possibles.

■ Formation recommandée

Ecole d'ingénieur ou Master II en mathématiques appliquées ou calcul scientifique

■ Ecole doctorale

Pau et Pays de l'Adour - Sciences Exactes et leurs Applications (SEA)

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

BARUCQ Hélène
INRIA-Bordeaux

■ Chercheur à contacter

RAMIERE Isabelle
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 30 38
isabelle.ramiere@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© A.Aubert|CEA

Application de la fabrication additive pour la réalisation de combustibles nucléaires innovants en UO₂

DEC/SA3E/LCU

La fabrication additive ou autrement nommée impression 3D s'impose progressivement comme un procédé de réalisation révolutionnant les principes traditionnels de conceptions.

Ces technologies déjà en forte progression dans le monde de l'industrie est désormais en cours d'évaluation pour l'élaboration de combustibles nucléaires innovants. Le développement de nouveaux réacteurs, la recherche d'amélioration des performances du parc nucléaire actuel est un terrain fertile à l'émergence de nouveaux concepts souvent impossibles à fabriquer par la technique standard de la métallurgie des poudres.

Le Laboratoire des Combustibles Uranium (LCU) dont une des missions est l'étude des procédés de fabrication de combustible est engagé dans une démarche d'évaluation d'une technologie de fabrication additive appelée robocasting » ou micro-extrusion orientée vers la réalisation de matériaux CERMET à base d'UO₂. Au cours des travaux précédents, des essais préliminaires prometteurs ont été réalisés sur matériaux non radioactifs et un atelier dédié a été mis en place. Les objectifs

Le sujet proposé consiste à poursuivre l'étude sur matériau UO₂ en utilisant ces nouveaux moyens.

Un large champ d'investigation s'ouvre ainsi pour l'optimisation des techniques et la compréhension de la physique des phénomènes mis en jeu.

Les travaux de thèse s'attacheront à l'utilisation des outils de stratégie de la recherche expérimentale (plans d'expériences) ainsi qu'à la modélisation du processus d'impression pour conduire

à l'optimisation des objets fabriqués.

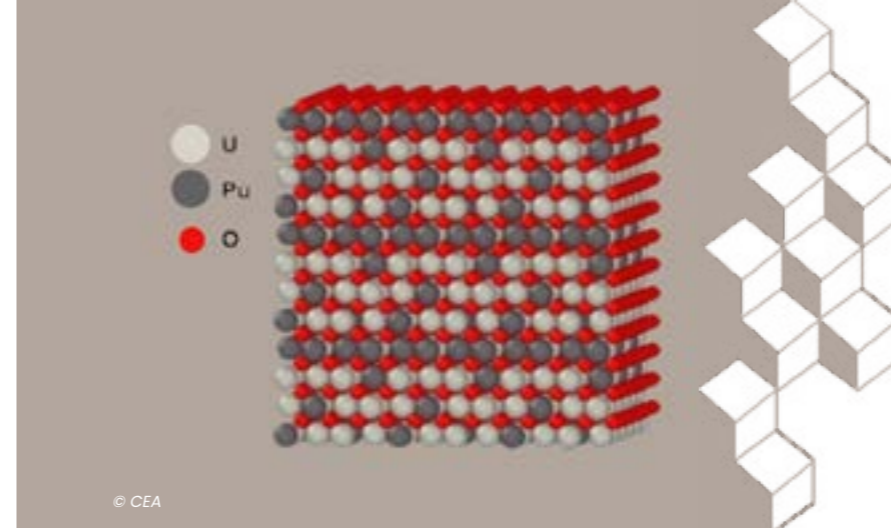
Ces études d'optimisation concerneront à la fois la formulation mais aussi l'ensemble des paramètres de la machine d'impression. Les travaux seront poursuivis jusqu'aux caractérisations des objets et à la démonstration de leurs performances.

Collaboration externe envisagée :

Le doctorant pourra s'appuyer sur les compétences et expertises de différents laboratoires du CEA impliqués dans le projet ainsi que d'un cadre collaboratif académique (IRCER Limoges). Cette collaboration avec l'IRCER a déjà fait l'objet d'un précédent contrat, les équipes de l'IRCER ayant par ailleurs une large expérience des applications fabrication additive céramiques [1,2]. Il devra présenter un goût marqué pour l'approche expérimentale et quelques facilités pour l'utilisation d'outils numériques. Des connaissances en science des matériaux sont le minimum requis.

Dans le cadre de la collaboration entre l'IRCER (Limoges) et CEA (Institut IRESNE, Cadarache), des déplacements seront à prévoir pour bénéficier des équipements et des savoir-faire propres aux deux laboratoires. Les travaux de thèse permettront à l'étudiant de valoriser ses compétences dans les domaines de la modélisation multiphysique ainsi que dans les champs d'application des technologies d'impression 3D.

Références :
1. Chartier, Pateloup et al, Techniques de l'ingénieur (2018).
2. Bourret, Pateloup et al, J.Eur. Cer. Soc. 38 (2019)



© CEA

Application de méthodes d'intelligence artificielle générative à la modélisation à l'échelle atomique des matériaux du nucléaire

DEC/SESC/LM2C

L'intelligence artificielle (IA) joue désormais un rôle crucial dans l'innovation en matière de conception de nouveaux matériaux pour la décarbonation de la production d'électricité.

Les méthodes d'IA générative, au cœur des outils de génération de texte ou d'image, peuvent également contribuer à la simulation du comportement des matériaux dans le domaine nucléaire, dans le but d'améliorer l'efficacité et la sûreté des réacteurs. Depuis quelques années, notre laboratoire développe des méthodes de ce type pour accélérer le calcul des propriétés à l'échelle atomique, ce qui est essentiel pour progresser dans la compréhension physique et la simulation des phénomènes causés par l'irradiation à laquelle ces matériaux sont exposés. Certains de ces matériaux sont chimiquement désordonnés, ce qui entraîne une distribution aléatoire des espèces chimiques sur le réseau cristallin, et une difficulté intrinsèque à traiter le nombre astronomique de configurations atomiques qui en résulte. Les méthodes génératives actuellement étudiées permettent de générer un ensemble de configurations représentatives, pour obtenir rapidement une estimation précise de la propriété recherchée.

L'objectif de cette thèse est de poursuivre le développement de ces méthodes et de les appliquer à la détermination des propriétés des défauts cristallins et des gaz de fission qui sont à la base de l'évolution de la microstructure sous irradiation. Le travail portera sur les oxydes mixtes d'actinides, participant à l'optimisation de l'usage de la matière fissile, ainsi que sur

les alliages multicomposants à haute entropie, actuellement considérés comme une alternative très prometteuse aux alliages conventionnels pour améliorer les propriétés des matériaux de structure. Ce projet, qui représente un axe de recherche majeur de nos activités, contribuera à fournir un nombre important de données aux modèles simulant le comportement en réacteur de ces matériaux.

Ce travail sera mené au sein du Département d'Études du Combustible de l'institut IRESNE du CEA à Cadarache, en Provence, au sein d'une équipe composée de nombreux experts en modélisation des matériaux, en étroite collaboration avec une autre équipe du CEA en région parisienne spécialisée dans l'intelligence artificielle. Les résultats seront diffusés grâce à des publications scientifiques et à la participation à des conférences nationales et internationales. Cette thèse permettra au/à la doctorant-e d'acquérir des compétences essentielles en sciences des matériaux, ainsi qu'en méthodes d'apprentissage automatique avancées, en analyse de données et en développement logiciel, ce qui sera précieux pour une carrière future dans la recherche académique ou industrielle, dans les domaines de l'IA et de l'ingénierie des matériaux.

Références :
<https://doi.org/10.1039/D3CP02790B>
<https://doi.org/10.1126/science.aaw1147>
<https://doi.org/10.3390/e23010098>

■ Formation recommandée

Ecole d'Ingénieur ou Master Recherche en Physique Numérique, Mathématiques appliquées, Physique-Chimie du solide

■ Ecole doctorale

Physique et Sciences de la Matière (ED352) Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

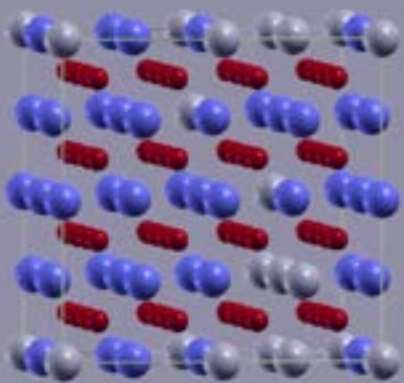
Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

BOURASSEAU Emeric
CEA - IRESNE

■ Chercheur à contacter

MESSINA Luca
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 61 80
luca.messina@cea.fr



© CEA

Calcul à l'échelle atomique de propriétés structurales et thermodynamiques pour l'amélioration des diagrammes de phase d'oxydes d'actinides contenant des actinides mineurs

DEC/SESC/LM2C

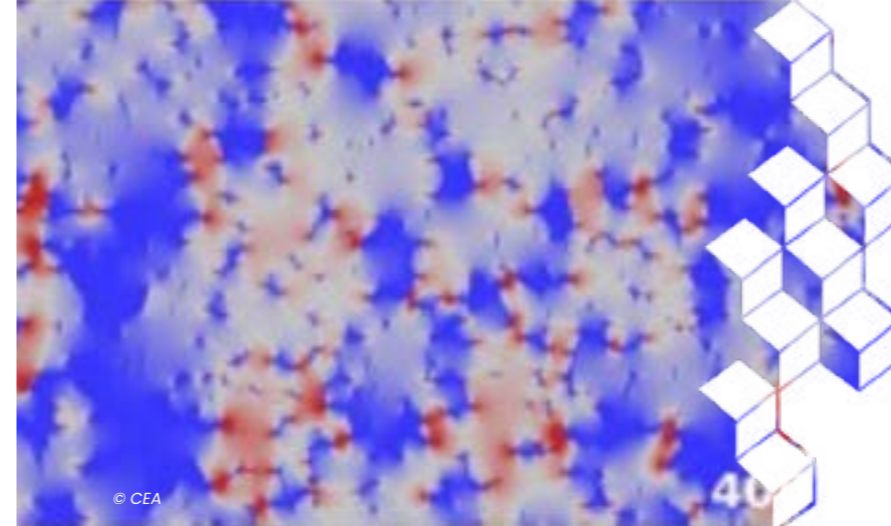
La France est engagée dans une démarche visant à économiser les ressources d'uranium pour s'assurer de la pérennité de l'utilisation de l'énergie nucléaire et à réduire la quantité de déchets ultimes produits.

Cette démarche est envisagée en plusieurs étapes : tout d'abord un passage du monorecyclage actuel du plutonium (Pu) dans les réacteurs à eau pressurisée à un multirecyclage du Pu dans ce même type de réacteurs, puis à plus long terme un multirecyclage du Pu dans des réacteurs à neutrons rapides et enfin la transmutation des actinides mineurs produits sous irradiation.

Les combustibles (U,Pu)O₂ actuels seront recyclés pour la fabrication de nouveaux combustibles, qui contiendront donc quelques pourcents d'actinides mineurs, en particulier d'américium et de neptunium. Il est donc important de connaître précisément les propriétés thermiques et thermodynamiques des composés du système (U-Pu-Am-Np-O) afin d'améliorer les processus de fabrication et d'évaluer l'impact des d'actinides mineurs sur le comportement de ces combustibles en réacteur. Pour obtenir un modèle optimisé de ce système complexe, une bonne description de sous-systèmes ternaires et quaternaires est essentielle. Les systèmes (U-Pu-O) et (U-Am-O) ont été revisités ces dernières années et sont assez bien décrits. En revanche, il n'existe actuellement que très peu de données expérimentales sur le système (Pu-Am-O) ou sur les systèmes impliquant le neptunium, par exemple (U-Np-O) et (Pu-Np-O). Il est donc nécessaire d'obtenir une meilleure connaissance de ces systèmes et de compléter les données expérimentales disponibles.

Les méthodes de modélisation à l'échelle atomique (calcul de structure

électronique, potentiels interatomiques empiriques) permettent de calculer de nombreuses propriétés des matériaux, en particulier structurales, électroniques, thermodynamiques et mécaniques, utiles pour comprendre et/ou prédire leur comportement dans des conditions variées. L'objectif de cette thèse est d'utiliser ces méthodes pour calculer les propriétés structurales et thermodynamiques des composés du système Uranium - Plutonium - Américium - Neptunium - Oxygène et de contribuer, en complément des études expérimentales, à améliorer la description du diagramme de phase de ce système. Les résultats obtenus serviront à alimenter les modèles thermodynamiques, en particulier ceux de la base de données internationale TAF-ID. Le projet sera réalisé dans un environnement scientifique dynamique au sein du Département d'Etudes des Combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache) avec, d'une part la contribution au développement d'outils de simulation et l'utilisation de données expérimentales de premier plan dans le domaine du comportement sous irradiation du combustible et, d'autre part des travaux théoriques intéressants de nombreux domaines d'application. Le travail bénéficiera de plusieurs collaborations avec des laboratoires d'autres centres CEA et s'inscrira dans le cadre d'un projet collaboratif européen. Les travaux conduiront à des participations à des conférences nationales et internationales et à la rédaction de publications.



© CEA

Calcul de la conductivité thermique des combustibles UO₂ et de l'influence des défauts d'irradiation

DEC/SESC/LM2C

L'étude du comportement sous irradiation du combustible nucléaire fait l'objet de simulations dont les résultats dépendent étroitement de ses propriétés thermiques et de leurs évolutions avec la température et l'irradiation.

La conductivité thermique, qui est l'une des données d'entrée de ces simulations, peut à présent être obtenue pour l'oxyde 100% dense par simulation de dynamique moléculaire à l'échelle du monocristal, mais l'effet de défauts comme les défauts induits par l'irradiation (boucle d'irradiation, amas de lacunes) voire même des joints de grains (céramique avant irradiation) reste difficile à évaluer de façon couplée.

L'ambition de ce travail est d'inclure des défauts dans des supercellules de simulation et de calculer leur effet sur la conductivité thermique. En fonction de la taille des défauts considérés nous utiliserons soit la DFT (Density Functional Theory) soit un potentiel empirique ou numérique pour effectuer les simulations de dynamique moléculaire. Le code AlmaBTE permet de calculer la diffusion des phonons par des défauts ponctuels et le calcul de la diffusion des phonons par les dislocations et leur transmission à une interface ont aussi été récemment implémentés. Ainsi, le chaînage calculs atomistiques / AlmaBTE permettra de déterminer l'effet de la microstructure polycristalline et des défauts d'irradiation sur la conductivité thermique. A l'issue de cette thèse, les propriétés obtenues seront utilisées dans les outils de simulation existants afin d'estimer la conductivité d'un élément de volume (effet additionnel de la microstructure notamment du réseau poreux, calculs de mécanique des milieux continus avec la méthode FFT, donnée qui sera

enfin intégrée dans la simulation du comportement de l'élément combustible sous irradiation.

La thèse s'effectuera au sein du Département d'Etudes des Combustibles (Institut IRESNE-CEA Cadarache), dans un environnement scientifique caractérisé par une grande expertise sur la modélisation des matériaux, en collaboration étroite avec d'autres équipes du CEA à Grenoble et en région parisienne expertes des calculs atomistiques.

■ **Formation recommandée**
Physique-Chimie du solide, Physique Numérique, Mathématiques appliquées

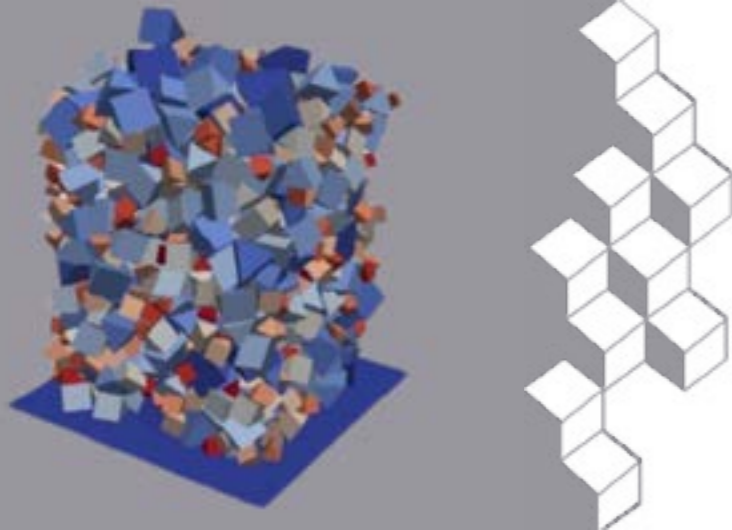
■ **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352) Aix-Marseille Université

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/12/2023

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
BERTOLUS Marjorie
CEA - IRESNE

■ **Chercheur à contacter**
BOUCHET Johann
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 44 07
johann.bouchet@cea.fr



© CEA

Comportement thermomécanique d'un lit de particules immergées à grande polydispersité : comparaison entre expérience et simulation

DEC/SESC/LMCP

Dans de nombreux domaines les milieux granulaires sont le siège de phénomènes physiques complexes. L'aspect multiéchelle de leur microstructure rend la prédiction et la modélisation des transferts thermiques et de leurs propriétés non triviales à évaluer.

Dans le cas des poudres céramiques, il n'est pas rare d'avoir à considérer des poudres fortement polydispersées dont la taille des grains s'étend sur plusieurs ordres de grandeurs. Dans ces conditions, les différentes tailles de porosité et la multiplicité des surfaces de transfert de chaleur rendent l'évaluation et la simulation des propriétés thermiques des poudres complexe à calculer.

Pour ce faire des lois empiriques homogénéisées sont communément utilisées. Elles permettent un calcul rapide des propriétés mais reposent sur un certain nombre de paramètres empiriques qui en limitent leur domaine d'application. Les outils de simulation, comme la méthode DEM/FFT [1], permettent de décrire plus finement la microstructure de l'empilement granulaire au prix d'un coût de calcul plus important. Ces méthodes sont utilisées pour challenger les modèles et mieux comprendre la compétition entre les différents modes de transferts thermiques dans l'empilement (conduction dans le gaz, conduction dans les grains, conductance au contact entre les grains, rayonnement etc).

Afin de tester les modèles et les outils de simulation et les améliorer, une précédente thèse a été conduite sur l'effet de la taille des grains et de l'atmosphère sur la conductivité thermique équivalente [2]. Elle a permis de mieux comprendre la compétition entre les transferts thermiques de différentes échelles de porosités et de l'effet de la pénétration du gaz dans la

microstructure et a permis de proposer de nouveaux modèles de conductivité thermique équivalente.

Cette thèse se positionne comme la suite de la précédente et a pour but d'étudier l'influence de la granulométrie de la répartition des grains sur la conductivité du milieu granulaire. Elle comportera un volet expériences pour acquérir des données fiables et maîtrisées et un volet simulation/modélisation pour mieux comprendre et modéliser la thermique dans ces milieux. Elle sera réalisée en collaboration entre le département d'études des Combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache) et l'IUSTI à Marseille. La partie expérimentale sera réalisée à l'IUSTI et les simulations sur les calculateurs du CEA Cadarache. Une attention particulière sera portée sur l'analyse des incertitudes de mesure et de simulation.

Ce sujet, qui intéresse de nombreux domaines industriels comme la production ou la transformation de l'énergie, les échangeurs de chaleur ou bien encore le génie des procédés, permettra de valoriser facilement les compétences acquises à l'issue de la thèse, que ce soit dans l'industrie ou en recherche académique.

[1] Calvet, T., Vanson, J. M., & Masson, R. (2022). A DEM/FFT approach to simulate the effective thermal conductivity of granular media. *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107339.

[2] Letessier, J., Gheribi, A. E., Vanson, J. M., Duguay, C., Rigollet, F., Ehret, N., & Gardarein, J. L. (2023). Thermal transport-porosity-microstructural characteristics: Unpicking the relationship in ultra-porous α -Al₂O₃ powder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 205, 123898.



© A. Aubert | CEA

Compréhension et modélisation du transport des gaz dans un combustible UO₂ présentant plusieurs familles de porosités

DEC/SESC/LEVA

Les céramiques à base de dioxyde d'uranium UO₂ constituent les combustibles nucléaires privilégiés des réacteurs en service en France.

Afin de mener des études et expertises, le CEA développe des schémas numériques avancés pour la simulation prédictive du comportement de ces combustibles, s'appuyant sur une démarche d'amélioration continue des modèles et des lois de propriétés physiques des matériaux.

Les combustibles nucléaires de type UO₂ sont des céramiques poreuses dont la microstructure dépend de leur procédé de fabrication (compaction de poudres), notamment en termes de forme et localisation de la porosité. Dans le cas du travail de recherche proposé ici, cette porosité est composée de deux familles (Meynard et al, 2018) : une famille de forme sphérique de petite taille et une famille de forme filamenteuse de plus grande taille. La porosité filamenteuse est pour partie connectée avec le milieu extérieur au combustible (porosité dite ouverte et percolante) et la porosité sphérique est plus isolée (porosité dite fermée). Les phénomènes physiques prenant place en réacteur entraînent une évolution de ces porosités et la création de produits de fission gazeux qui tendent à s'écouler dans le réseau poreux.

L'objectif de cette thèse est de développer un modèle d'écoulement de gaz en présence de : 1/ deux populations chimiques (xénon/krypton et hélium), 2/ deux populations de pores de topologie et d'échelle différentes, et 3/ dont

les propriétés évoluent avec le temps.

Compte tenu de l'hétérogénéité de la microstructure, le modèle d'écoulement s'appuiera sur des outils numériques de génération de microstructures poreuses partiellement disponibles dans la littérature tels que les classiques pavages de Voronoï ou les plus récents processus de dépôt-compaction/diagenèse [Wojtacki et al, 2017]. L'effet des deux réseaux de porosité sur l'évolution de la perméabilité effective du milieu sera ensuite évalué en associant des méthodes analytiques et numériques de calcul d'écoulement. Une validation finale du modèle sera menée par comparaison avec des observations expérimentales récentes réalisées sur combustibles non irradiés et irradiés comprenant des mesures de porosités et de relâchement de gaz.

Ce travail de thèse sera mené au Service d'Etudes et Simulation du comportement des Combustibles du Département d'Etudes des Combustibles de l'institut IRESNE (CEA-Cadarache) et en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université de Montpellier. Il pourra être valorisé par des publications et des présentations en conférences internationales.

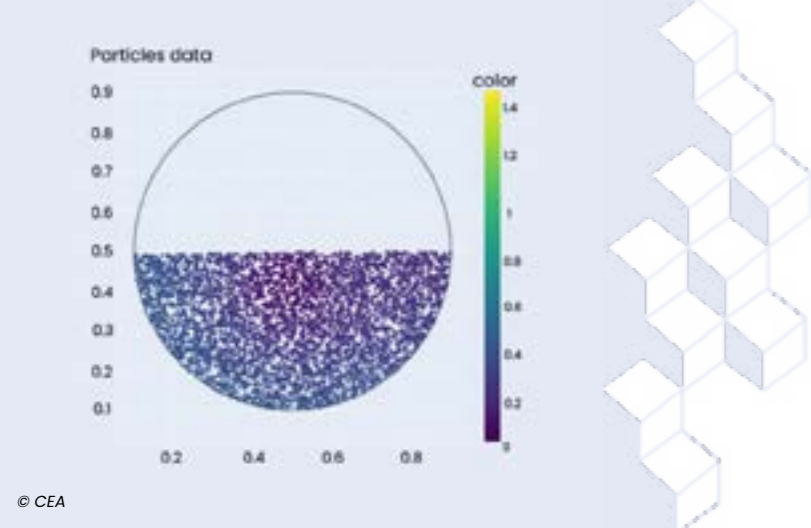
■ **Ecole doctorale**
Information, Structures et Systèmes (I2S)
Montpellier

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
MONERIE Yann
Université Montpellier - CNRS
LMGC (Laboratoire de mécanique et de génie civil) de Montpellier

■ **Chercheur à contacter**
MULLER Emmanuelle
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Energie bas carbone
04 42 25 71 23
emmanuelle.muller@cea.fr



© CEA

Développement d'un capteur logiciel pour le procédé de mélange-broyage du combustible

DEC/SESC/LMCP

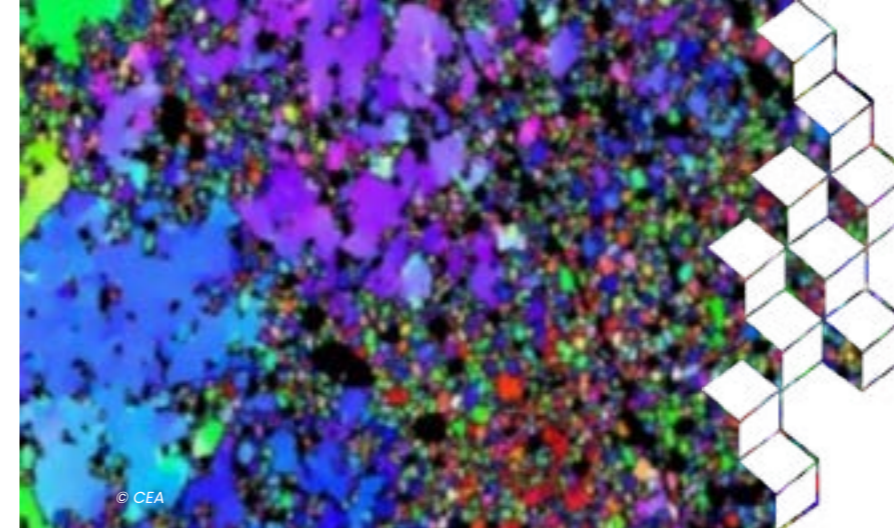
Cette thèse vise à développer un capteur logiciel innovant pour le procédé de mélange-broyage, essentiel à la fabrication des combustibles nucléaires.

L'ambition est de créer un capteur logiciel alimenté par un dispositif expérimental, offrant une estimation en temps réel des propriétés du produit.

aux simulations, tout en gérant les imprécisions et les écarts.

L'objectif central est de concevoir une méthode qui estime avec précision et à haute fréquence les propriétés du milieu granulaire, comme la granulométrie. Ce projet envisage d'établir une relation directe entre les capteurs physiques et les propriétés matérielles grâce à la simulation et à un modèle d'apprentissage. Le challenge réside dans la prédiction de ces propriétés sans évaluer directement l'état interne du processus.

Le candidat sera accueilli au sein du département d'études des combustibles (Institut IRESNE, CEA-Cadarache). Il s'attellera d'abord à inventorier les capteurs physiques adaptés, avant de construire une base de données synthétique à partir de simulations. Ces données alimenteront un modèle d'apprentissage profond récurrent, ajustable par un filtre de Kalman. L'enjeu est aussi d'intégrer efficacement les données réelles des bancs d'essais



© CEA

Etude des phénomènes de restructuration dans le combustible UO2 par des techniques de diffraction des électrons en haute résolution

DEC/SA3E/LCPC

La diffraction des électrons rétrodiffusés a contribué à la mise en évidence, dans des pastilles de combustible UO2, d'évolutions microstructurales telles que la subdivision des grains en sous-grains faiblement désorientés, consécutivement soit à une sollicitation mécanique à haute température, soit à une irradiation. Toutefois, les analyses réalisées jusqu'à présent présentent des limitations.

Le principal objectif de cette thèse est d'améliorer leur résolution angulaire et spatiale. Pour cela, les techniques expérimentales d'EBSD (Electron BackScatter Diffraction) haute résolution (HR) et en transmission (TKD : Transmission Kikuchi Diffraction) seront développées et appliquées à différents combustibles restructurés. Les nouvelles données acquises permettront d'améliorer la connaissance des populations de défauts (dislocations) et de l'état mécanique du combustible à l'échelle locale. Elles pourront alimenter un modèle de plasticité cristalline.

courte au laboratoire du LEM3 de l'université de Lorraine basé à Metz qui encadre cette thèse en collaboration avec le CEA et qui dispose d'une expérience internationalement reconnue dans la caractérisation des matériaux par les techniques envisagées dans cette étude.

Ce sujet permettra au doctorant d'acquérir des compétences en caractérisation microstructurale fine des matériaux, en exploitation de données expérimentales et en modélisation micromécanique, qui seront applicables à de nombreux matériaux. Le travail de thèse se déroulera principalement au sein du Département d'études des combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache) dans un laboratoire de caractérisation et d'études des propriétés des combustibles vierges et irradiés. Il se déroulera aussi sur une durée plus

■ **Formation recommandée**
Science des matériaux, physique du solide

■ **Ecole doctorale**
Chimie Mécanique Matériaux Physique (C2MP)- Université de Lorraine

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
TAUPIN Vincent
CNRS
vincent.taupin@univ-lorraine.fr

■ **Chercheur à contacter**
ZACHARIE AUBRUN Isabelle
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 20 05
isabelle.aubrun@cea.fr



Etude des transitions de phases dans les oxydes mixtes sous-stœchiométriques à base d'uranium

DEC/SA3E/LCPC

Certains oxydes mixtes d'actinides sous-stœchiométriques sont sujets à une séparation de phase à basse température, caractérisée par l'émergence de deux phases : l'une stœchiométrique et l'autre qui porte l'intégralité du déficit en oxygène.

C'est le cas des combustibles MOX ((U,Pu)O_{2-x}) à des concentrations élevées de Pu telles que celles envisagées dans les systèmes de génération IV. Ces transitions affectent aussi les oxydes mixtes ayant des teneurs moyennes en Pu plus faibles, étant donné que, selon le procédé de fabrication, un certain degré d'inhomogénéité de la distribution de Pu peut subsister. Ce point est d'autant plus important dans un contexte de multi-recyclage du Pu. Ainsi, des modifications locales des paramètres de maille conduisent à une distribution inhomogène des déformations induisant des effets délétères au cours du processus de fabrication ou vis-à-vis des performances du matériau en service. Il est à noter que les oxydes mixtes à base de Ce, analogue non actif du plutonium, donnent également lieu à ce type de séparation de phase. Il n'existe pas à ce jour de compréhension des mécanismes physiques sous-jacents et une modélisation physique et prédictive du problème constitue donc un véritable défi à la fois technologique et scientifique. Ce projet a pour but de caractériser

ces séparations de phases, d'en déterminer les origines physiques et de développer des méthodologies pour les interpréter, en se basant à la fois sur des simulations et des expériences.

Cet travail sera principalement basé à l'institut IRESNE (CEA-Cadarache) mais réalisé en collaboration avec des équipes de Marcoule (ICSM) pour la partie expérimentale et de Saclay pour la simulation numérique. D'autres équipes basées à l'étranger seront également associées à ce travail : le JRC de Karlsruhe mais aussi une équipe de l'ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation) spécialisée dans la caractérisation par diffraction de neutrons. Ainsi le candidat bénéficiera d'un environnement scientifique riche et stimulant et aura, en outre, la responsabilité de proposer, réaliser et interpréter des expériences sur des grands instruments. Les compétences et connaissances acquises par le candidat seront valorisées à travers la rédaction de publications et la présentation de ses travaux dans des conférences internationales.



Etude du pressage de poudres UO₂ en vue de la validation expérimentale d'une modélisation par éléments finis

DEC/SA3E/LCU

Cette thèse s'inscrit dans un contexte d'optimisation de l'étape de compaction lors de la fabrication industrielle de combustible UO₂.

Cette problématique de pressage de poudre pour la fabrication de compacts est fréquemment rencontrée dans de nombreux domaines industriels (pharmaceutique, agro-alimentaire, métallurgie et matériaux de construction notamment). Dans ce contexte, l'objectif du travail porte sur l'acquisition et l'interprétation de données expérimentales relatives au pressage de poudre UO₂ en vue de la modélisation de cette étape.

Cette thèse associera l'expérimentation et la modélisation en vue d'une part de prédire les caractéristiques des compacts obtenus en fonction des paramètres matériaux et procédés et d'autre part de valider les simulations éléments finis basées sur une description élastoplastique poreuse des poudres. Le futur doctorant sera amené à utiliser et développer des moyens expérimentaux et à étendre et valider les moyens de calculs scientifiques du Département d'Etudes des Combustibles (Institut IRESNE, CEA-Cadarache). Ainsi, à l'issue de cette étude réalisée en collaboration avec un partenaire industriel, le doctorant

valorisera ses résultats au travers de publications et participations à des congrès et aura acquis de solides compétences et une expertise dans le domaine des milieux granulaires et de la compaction.

Ces compétences sont recherchées et valorisables dans un grand nombre de domaines industriels qui utilisent des poudres et des pastilles et ont des problématiques similaires (pharmaceutique, agro-alimentaire, métallurgie et matériaux de construction notamment). Le candidat devra être titulaire ou en cours d'obtention d'un Master 2 en mécanique du solide ou en science des matériaux.

■ **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieur ou Master 2 en mécanique du solide ou en matériaux

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

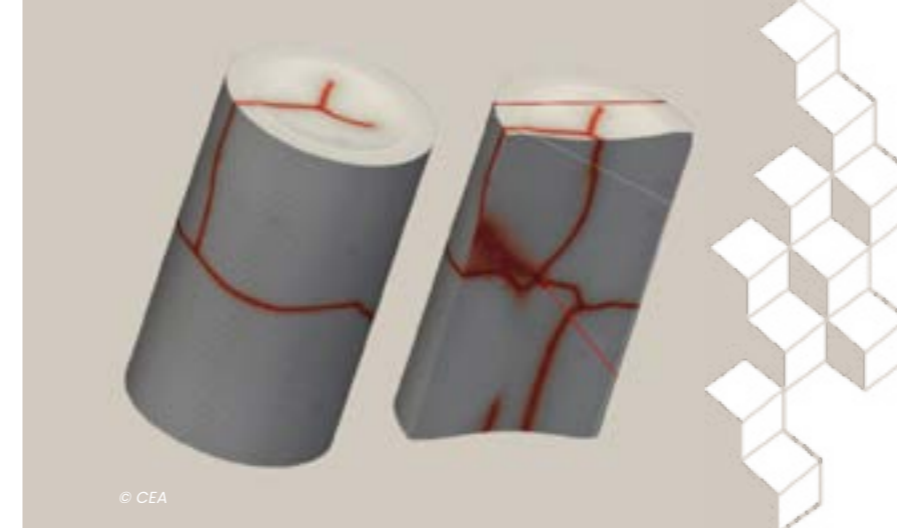
■ **Chercheur à contacter**
BLANC Nicolas
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 62 13
nicolas.blanc@cea.fr



© A.Aubert/CEA

Etude et quantification des propriétés optiques du combustible nucléaire : vers une meilleure connaissance de l'interaction laser/matière

DEC/SA3E/LAMIR



© CEA

Exploration des capacités des méthodes Hybrid High Order en raffinement adaptatif de maillage et transition endommagement/rupture pour la simulation de la fissuration

DEC/SESC/LMCP

La production d'électricité d'origine nucléaire revêt aujourd'hui une importance accrue pour la lutte contre le changement climatique et l'indépendance énergétique.

Dans ce cadre général, cette thèse s'inscrit dans une démarche visant à améliorer la compréhension des propriétés thermophysiques et du comportement sous irradiation des combustibles nucléaires, dans des conditions de fonctionnement normales ainsi que lors de scénarios d'accidents hypothétiques. Pour réaliser cet objectif, l'utilisation innovante du chauffage par laser est employée. Les techniques laser permettent non seulement de caractériser précisément les propriétés des combustibles nucléaires irradiés (ou neufs), mais également de les solliciter sous des gradients thermiques spatiaux et temporels contrôlés afin d'étudier les mécanismes de base affectés.

La connaissance précise des propriétés optiques des matériaux, régissant notamment le couplage du faisceau avec le substrat considéré, est cruciale dans les expériences de chauffage par laser. Cependant, ces données sur combustible nucléaire sont rares, complexes à mesurer et reportent des valeurs assez différentes. Cette thèse vise à progresser sur cette thématique, notamment en ciblant les matériaux d'intérêt. On s'appuiera pour

cela sur une démarche combinant expérimentation et modélisation pour quantifier les propriétés optiques des matériaux nucléaires, de la température ambiante jusqu'à la fusion.

La thèse sera menée dans un cadre collaboratif (CHAIRE MATLASE) entre le LAMIR (Laboratoire d'Analyse de la Migration des Radioéléments) au sein du Département d'Etude des Combustibles (Institut IRESNE, CEA-Cadarache) et l'équipe ILM (Interaction Laser Matière) de l'Institut Fresnel de Marseille, qui apportera son expertise dans le domaine des interactions laser de forte puissance / matériaux et de l'instrumentations optique pour le développement du système et des diagnostics optiques complexes.

Ce cadre permettra au doctorant d'évoluer dans un environnement scientifique stimulant et lui permettra de valoriser ses travaux de recherche, en France comme à l'étranger. Le candidat ou la candidate recruté(e) devra être diplômé(e) d'un master ou d'un titre d'ingénieur dans le domaine de l'optique, de la photonique, des procédés laser et/ou matériaux.»

■ **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352)
Aix-Marseille Université

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
GALLAIS Laurent
Ecole Centrale Marseille et Institut Fresnel - UMR7249 - Equipe ILM

■ **Chercheur à contacter**
DOUALLE Thomas
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 28 89
thomas.doualle@cea.fr

Une simulation robuste et efficace de la fissuration fragile des combustibles nucléaires est essentielle pour décrire leurs comportements en situations normales et incidentelles.

Des travaux récents ont mis en lumière l'intérêt d'utiliser une approche régularisée à gradient d'endommagement dans le cadre d'une discrétisation spatiale par la méthode Hybrid High Order (HHO), qui appartient à la famille des méthodes de Galerkin discontinues (Thèse de doctorat de D. Siedel, 2023). L'utilisation pratique de ces modèles se heurtent à des tailles de mailles très faibles et leur incapacité à traiter des grands mouvements relatifs des lèvres de la fissure. Ce sujet propose d'exploiter les capacités spécifiques de la méthode HHO pour traiter ces deux difficultés :

- Les méthodes HHO simplifient grandement le développement d'algorithmes de raffinement de maillage adaptatif,
- Les méthodes HHO permettent de simplifier la transition endommagement/rupture qui consiste à insérer des surfaces de discontinuités sur les lieux de propagation des fissures. Ces surfaces peuvent alors avoir des mouvements relatifs arbitraires.

Les développements de la thèse se feront dans le code de mécanique des structures de nouvelle génération Manta développé au CEA/DES. La thèse se déroulera à l'Institut IRESNE (CEA-

Cadarache) en collaboration avec les équipes du CEA Saclay, le Centre des Matériaux des Mines de Paris et l'Onera. Dans un premier temps, le doctorant devra étendre le solveur Manta et vérifier ses capacités à traiter la fissuration fragile par un modèle d'endommagement à gradient en HHO. La vérification se fera par comparaison croisée avec le code A-Set. Dans un second temps, l'aspect adaptation de maillage de HHO sera abordé. In fine, l'insertion de fissures le long des trajets prédites par le modèle en collaboration avec l'Onera.

Les travaux de thèses seront valorisés dans des conférences nationales et internationales, ainsi que via des articles dans des journaux à comité de lecture.

■ **Formation recommandée**
École d'ingénieur ou master de recherche. Le doctorant recherché devra posséder une solide culture numérique et mécanique et un goût prononcé pour la simulation numérique. Il devra faire preuve d'autonomie et être force de proposition

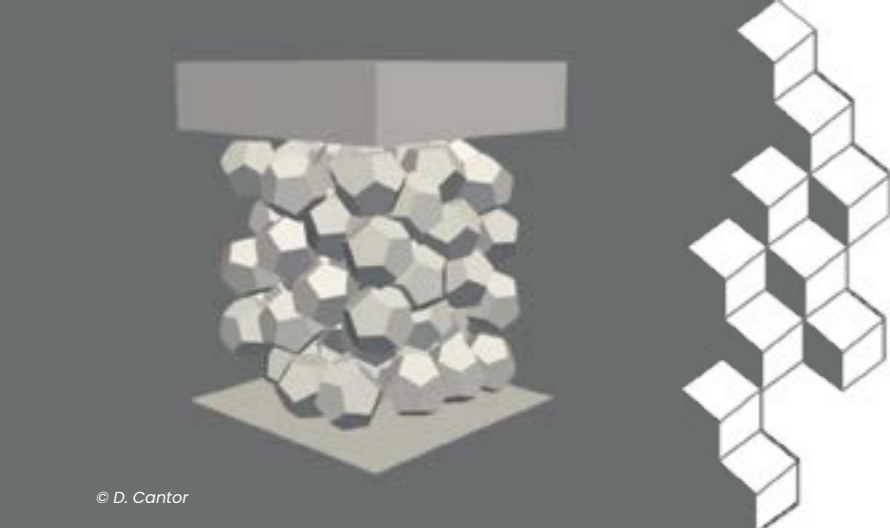
■ **Ecole doctorale**
Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Energétique (ISMME)
Paris Sciences et Lettres

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
BESSION Jacques
CNRS affecté à l'Ecole des Mines de Paris
Centre des Matériaux UMR 7633

■ **Chercheur à contacter**
HELPER Thomas
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 22 67
thomas.helfer@cea.fr



© D. Cantor

Fabrication d'un combustible UO₂ à partir de granulés : étude de l'influence des caractéristiques des granulés sur la microstructure et les propriétés du combustible

DEC/SA3E/LCU

Les combustibles nucléaires d'oxyde d'uranium sont généralement fabriqués par pressage de particules d'UO₂ suivi d'un frittage, ce qui conduit à l'obtention d'une céramique.

Dans ce procédé, appelé métallurgie des poudres, les caractéristiques des particules initiales d'UO₂ ont une influence sur la microstructure de la céramique obtenue, par exemple le volume de porosité et sa répartition. Les caractéristiques microstructurales des combustibles UO₂ conditionnent ensuite les propriétés des combustibles en réacteur. Si le lien entre microstructure et propriétés a fait l'objet de plusieurs travaux, le lien entre les particules initiales et la microstructure a été peu étudié. Cette thèse vise ainsi à mieux le comprendre, plus précisément dans le cas où les particules sont des granulés, c'est-à-dire des amas de poudre pré-compactée mesurant plusieurs centaines de micromètres. L'objectif à terme est d'améliorer le pilotage des caractéristiques microstructurales grâce au procédé de fabrication.

La thèse comportera un volet expérimental et un volet de modélisation/simulation. Le volet expérimental sera prépondérant. Il sera basé au sein de l'ICPE Labo UO₂ de l'institut IRESNE, au CEA Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ce laboratoire est spécialisé dans l'étude de la fabrication des combustibles

à base de dioxyde d'uranium UO₂. Ce volet consistera à développer des méthodologies de préparation de différents types de granulés, puis réaliser des fabrications de céramiques nucléaires d'UO₂ à partir de ceux-ci, en faisant varier certains paramètres opératoires, notamment les paramètres de pressage. Des caractérisations fines de la microstructure (sur comprimés crus ou frittés) seront réalisées et les résultats seront interprétés en vue d'améliorer la compréhension des phénomènes. Le volet modélisation/simulation sera plus réduit. Il consistera à réaliser des simulations DEM (modélisation par éléments discrets) pour aider à l'interprétation et sera réalisé en collaboration avec un laboratoire universitaire et avec d'autres laboratoires du CEA. Les résultats de la thèse pourront être valorisés par des publications dans des journaux ou dans des conférences. Les compétences professionnelles acquises pourront être valorisées dans divers domaines, pour des applications nucléaires ou non-nucléaires : comportement des milieux granulaires, métallurgie des poudres, fabrication et caractérisation des céramiques, simulation DEM...

■ **Formation recommandée**
Sciences pour l'ingénieur

■ **Ecole doctorale**
Information, Structures et Systèmes (I2S)
Montpellier

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
WATTRISSE Bertrand
Université de Montpellier
LMGC

■ **Chercheur à contacter**
ABLITZER Carine
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 74 63
carine.ablitzer@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© MANTA

Génération assistée de noyaux de calculs complexes en mécanique du solide

DEC/SESC/LMCP

Les lois de comportement utilisées dans les simulations numériques décrivent les caractéristiques physiques des matériaux simulés.

À mesure que notre compréhension de ces matériaux évolue, la complexité de ces lois augmente. L'intégration de ces lois constitue une étape critique pour la performance et la robustesse des calculs scientifiques. De ce fait, cette étape peut conduire à des développements intrusifs et complexes dans le code.

De nombreuses plateformes numériques telles que FEniCS, FireDrake, FreeFEM, Comsol, proposent des techniques de génération de code à la volée (JIT, pour Just In Time) pour gérer différentes physiques. Cette approche JIT réduit considérablement les temps de mise en oeuvre de nouvelles simulations, offrant ainsi une grande versatilité à l'utilisateur. De plus, elle permet une optimisation spécifique aux cas traités et facilite le portage sur diverses architectures (CPU ou GPU). Enfin, cette approche permet de masquer les détails d'implémentation: une évolution de ces derniers est invisible pour l'utilisateur et est absorbée par la couche de génération de code.

Cependant, ces techniques sont généralement limitées aux étapes d'assemblage des systèmes linéaires à résoudre et n'incluent pas l'étape cruciale d'intégration des lois de comportement.

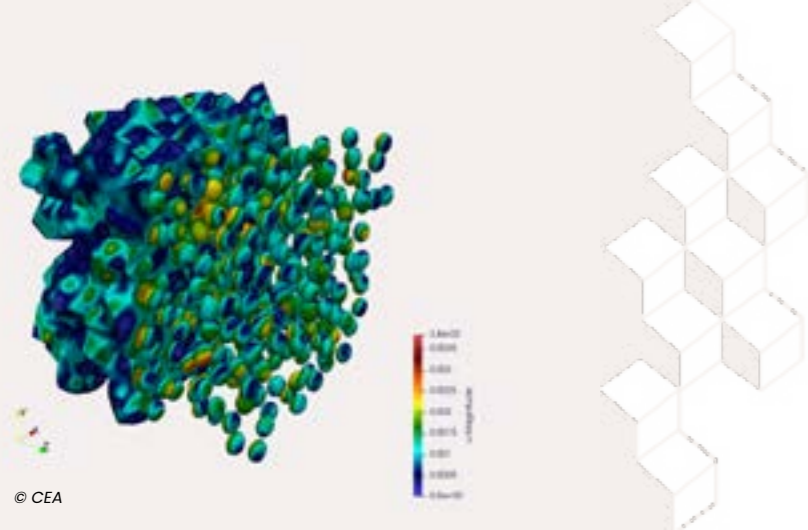
S'inspirant de l'expérience réussie du projet open-source mgis.fenics [1], cette thèse vise à développer une solution de génération de code à la volée dédiée au code de mécanique des structures de nouvelle génération Manta [2] développé par le CEA. L'objectif est de permettre un couplage fort avec les lois de comportement générées par MFront [3], améliorant ainsi la flexibilité, les performances et la robustesse des simulations numériques.

Le doctorant bénéficiera d'un encadrement de la part des développeurs des codes MFront et Manta (CEA), ainsi que des développeurs du code A-Set (collaboration entre Mines-Paris Tech, Onera, et Safran). Cette collaboration au sein d'une équipe multidisciplinaire offrira un environnement stimulant et enrichissant pour le candidat.

De plus, le travail de thèse sera valorisé par la possibilité de participer à des conférences et de publier des articles dans des revues scientifiques à comité de lecture, offrant une visibilité nationale et internationale aux résultats de la thèse.

[1] https://thelfer.github.io/mgis/web/mgis_fenics.html
[2] MANTA : un code HPC généraliste pour la simulation de problèmes complexes en mécanique.
[3] <https://thelfer.github.io/tfel/web/index.html>

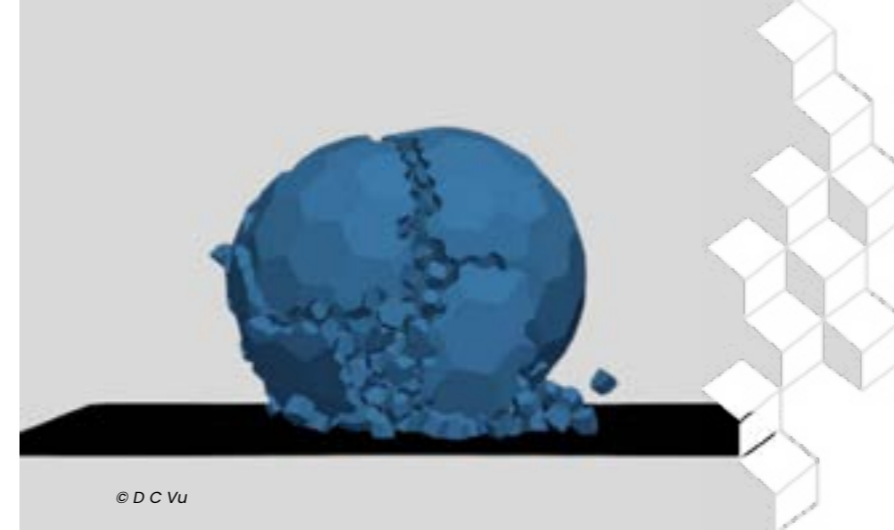
[Retour au sommaire](#)



© CEA

Implémentation d'algorithmes parallèles sur GPU pour les simulations du combustible nucléaire sur supercalculateurs exaflopiques

DEC/SESC/LDOP



© D C Vu

Métamodèle de la fragmentation pour la simulation du procédé de broyage de poudres

DEC/SESC/LDOP

Dans un contexte où le calcul haute performance (HPC) est en perpétuelle évolution, le design des nouveaux supercalculateurs tend à intégrer toujours plus d'accélérateurs ou de cartes graphiques (GPU).

L'un des enjeux majeurs des prochaines années est la refonte des algorithmes et le portage des codes de simulation numérique sur cartes graphiques. Ceci demande de revisiter les codes de simulation actuels, en particulier les codes de simulation modélisant le comportement du combustible nucléaire.

Depuis plusieurs années, le CEA a développé la plateforme de calcul PLEIADES dédiée à la simulation du comportement des combustibles, depuis la fabrication jusqu'au comportement en réacteur, puis lors du stockage. Elle inclut une parallélisation en mémoire distribuée MPI permettant une parallélisation sur plusieurs centaines de cœurs. Cette plateforme répond aux exigences des partenaires du CEA que sont EDF et Framatome, mais il est nécessaire de l'adapter pour les nouvelles infrastructures de calcul. Proposer une solution flexible, portable et performante pour les simulations sur des supercalculateurs équipés de GPU est d'un intérêt majeur afin de capturer des physiques toujours plus complexes sur des simulations comportant des domaines de calcul toujours plus grands.

Dans ce cadre, la thèse visera d'élaborer puis évaluer différentes stratégies de portage de noyaux de calculs sur GPU et l'utilisation de méthodes de répartition dynamique de la charge adaptés aux supercalculateurs GPUs actuels et futurs.

Le candidat s'appuiera sur des outils développés au CEA comme les solveurs thermo-

mécaniques MFEM-MGIS [1,2] ou MANTA [3]. Une étape importante consistera à réaliser de grands calculs de modélisation en 3D du comportement du combustible (modélisation multi-physique d'une pastille). Pour cela, l'étudiant sera amené à implémenter en C++ des solutions pour le GPU en parallélisation hybride MPI+CUDA en investiguant dans un premier temps des stratégies de résolution comme le «matrix-free» et dans un deuxième temps, les méthodes d'équilibrage de charge entre processus MPI. Les solutions apportées sur GPU seront alors évaluées sur les supercalculateurs nationaux comportant des milliers de cœurs de calcul et des GPU afin de s'assurer du passage à l'échelle.

Le candidat travaillera au sein du département d'études des combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache). Il sera amené à évoluer dans une équipe pluridisciplinaire composée de mathématiciens, physiciens, mécaniciens et informaticiens. A terme, les contributions de la thèse visent à enrichir la plate-forme numérique PLEIADES. L'objectif est ainsi de mettre en place les outils informatiques qui permettront dans quelques années de modéliser en 3D le comportement des crayons combustibles sur des résolutions inaccessibles pour le moment.

[1] MFEM-MGIS web site
 [2] Th. Helfer, G. Latu. « MFEM-MGIS-MFRONT, a HPC mini-application targeting nonlinear thermo-mechanical simulations of nuclear fuels at mesoscale ». IAEA Technical Meeting on the Development and Application of Open-Source Modelling and Simulation Tools for Nuclear Reactors, June 2022 - docx
 [3] O. Jamond & al. «MANTA : un code HPC généraliste pour la simulation de problèmes complexes en mécanique »

■ **Formation recommandée**
 HPC, Mathématiques appliquées

■ **Ecole doctorale**
 Mathématiques et Informatique de Marseille (MIM) - Aix-Marseille Université

■ **Date souhaitée de début de thèse**
 01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
 Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
 LATU Guillaume
 CEA

■ **Chercheur à contacter**
 PRAT Raphaël
 IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
 raphael.prat@cea.fr

Le procédé de broyage, utilisé depuis l'antiquité pour écraser graines et noix, est essentiel dans diverses industries, telles que l'industrie minière, le génie civil, la pharmacie et les procédés de fabrication des combustibles nucléaires.

La recherche actuelle vise à optimiser ce processus en améliorant les propriétés des poudres tout en réduisant le coût énergétique. Les méthodes expérimentales d'étude du broyage se heurtent à la complexité due aux forces dynamiques et aux changements constants des matériaux. Les avancées récentes en simulation, en utilisant la Méthode des Éléments Discrets (DEM), offrent une perspective d'étudier ces mécanismes, notamment dans le cadre du co-broyage pour la fabrication de combustibles nucléaires.

Ce sujet de thèse vise spécifiquement à accélérer la simulation de ces mécanismes pour une utilisation industrielle. L'objectif est de développer un métamodèle de fragmentation basé sur l'intelligence artificielle. Pour cela, il sera nécessaire de créer une base de données simulant la fragmentation de particules et de définir les caractéristiques essentielles du processus. L'approche comprendra plusieurs phases, dont la prédiction de la fragmentation d'une particule et l'apprentissage du mode de fragmentation à l'aide de techniques

avancées, comme les réseaux de neurones.

La recherche capitalisera sur les travaux antérieurs, notamment ceux de D.-C. Vu (thèse CEA 2020-2023), et sera validée grâce à des données expérimentales associées à d'autres travaux. Le doctorant bénéficiera d'importants moyens de simulation, avec accès aux ressources de calcul de l'institut IRESNE (CEA Cadarache) et d'autres plateformes. Ce projet de thèse vise à combiner expertise en broyage et techniques d'intelligence artificielle pour innover dans le domaine de la fragmentation des particules.

■ **Formation recommandée**
 Master 2, école d'ingénieurs mathématiques mathématiques appliquées, mécanique

■ **Date souhaitée de début de thèse**
 01/11/2024

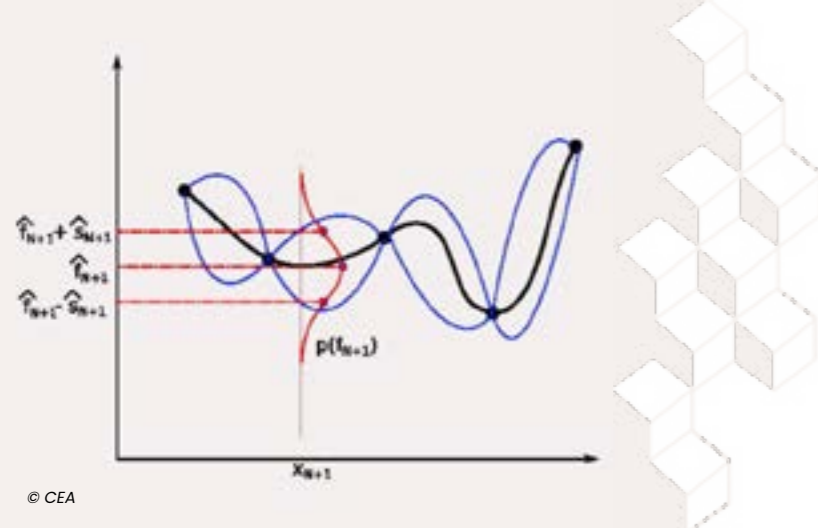
■ **Lieu de recherche**
 Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
 RADJAI Franck
 CNRS - LMGC (UMR CNRS 5508) Université de Montpellier

■ **Chercheur à contacter**
 AMARSID Lhassan
 IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
 04 42 25 44 96
 lhassan.amarsid@cea.fr

[Retour au sommaire](#)

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Modèle multi-fidélité pour la description des propriétés thermophysiques d'oxydes mixtes d'actinides, combustibles nucléaires des réacteurs à neutrons rapides

DEC/SESC/LM2C

Dans le contexte de la relance de la filière nucléaire, ce sujet de thèse a pour ambition de participer à la R&D sur les réacteurs à neutrons rapides, qui offrent la possibilité d'utiliser efficacement des combustibles à base d'oxydes mixtes MOX.

Ce combustible permet en effet une meilleure utilisation des ressources nucléaires, et une réduction des déchets nucléaires de hautes activités. Les simulations numériques sont une ressource extrêmement bénéfique pour modéliser le comportement thermomécanique et physico-chimique du combustible en réacteur. Les outils de calcul scientifique permettant de simuler ce comportement se basent, entre autres, sur des lois de comportement des propriétés des matériaux issus de mesures expérimentales qui sont difficiles à obtenir à haute température, ce qui peut parfois entraîner un manque de données dans des domaines d'utilisation importants.

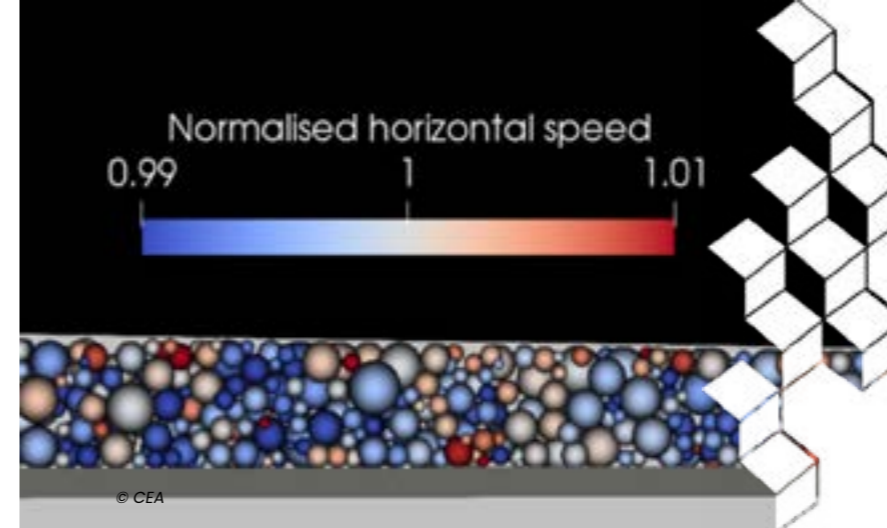
L'objectif de ce projet de thèse est de proposer des lois de comportement plus précises à l'aide de l'apprentissage automatique et d'un modèle multi-fidélité. Ce modèle mathématique sera développé en combinant des données issues de calculs à l'échelle atomique, qui peuvent être obtenues plus facilement à haute température, et des données expérimentales. Il s'agira d'une avancée scientifique majeure, car ce modèle intégrera pour la première fois des données issues de sources différentes. Les propriétés

thermodynamiques, notamment la conductivité thermique et la chaleur spécifique, seront au centre de cette étude. Le modèle multi-fidélité permettra également de guider les expériences futures pour améliorer ces lois de comportement, en identifiant les domaines où elles sont moins précises.

La thèse s'effectuera au sein du Département d'Études des Combustibles (Institut IRESNE-CEA Cadarache), le candidat rejoindra une équipe experte en modélisation multi-échelle des matériaux. Le travail bénéficiera de plusieurs collaborations avec des experts en mathématiques appliquées. Le candidat utilisera plusieurs techniques génériques, applicables à de nombreux domaines de la science des matériaux. Les travaux conduiront à des participations à des conférences nationales et internationales et à la rédaction de publications.

- **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352) - Aix-Marseille Université
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
BOURASSEAU Emeric
CEA
- **Chercheur à contacter**
ROMANOVA Mariya
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
mariya.romanova@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Modélisation et simulation du procédé de calandrage des électrodes Li-ion par méthode des éléments discrets

DEC/SESC/LMCP

L'optimisation de la performance des batteries est de nos jours un enjeu majeur pour le stockage de l'énergie électrique.

L'utilisation massive des batteries dans de multiples domaines (transports, énergies, communications, etc) en fait un sujet stratégique de recherche et de développement.

Leurs performances sont dictées par leur densité d'énergie d'une part et leur vitesse de charge/décharge d'autre part. La porosité des électrodes agit au premier ordre sur ces deux paramètres. Toutefois son effet est antagoniste : diminuer la porosité permet de gagner en densité d'énergie, au détriment de la conductivité ionique de l'électrolyte qui a lieu au sein des pores. Un compromis entre densité d'énergie et conductivité ionique est constamment recherché et fait l'objet de sujet de recherche.

Lors de sa fabrication l'électrode subit une étape de calandrage qui consiste à réduire sa porosité en lui appliquant une contrainte de compression entre deux cylindres. Le lien entre les données d'entrées du procédé de calandrage, les paramètres procédés et les caractéristiques finales du produit est mal connu. Une précédente thèse a permis de mettre en place un outil de simulation de cette étape de procédé. La méthode

de simulation par Éléments Discrets a été employée pour simuler le comportement granulaire du matériau actif, de son liant et de l'électrode. Cela a permis d'étudier l'effet des propriétés des grains et du liant (cohésion et de la plasticité) sur les propriétés finales de l'électrode et de se comparer qualitativement aux données expérimentales. L'objectif de cette thèse est de poursuivre le travail entrepris en enrichissant la simulation de la déformation du collecteur de courant et des grains composant le matériau actif. Ceci permettra d'étudier l'effet de ces paramètres et du calandrage sur les propriétés finales de l'électrode et en particulier sur leur topologie microstructurale.

Le doctorant sera accueilli au sein de l'institut IRESNE (CEA-Cadarache) dans le Laboratoire des Méthodes numériques et Composants physiques de la plateforme PLEIADES du Département d'Étude des Combustibles. Il bénéficiera d'un environnement faisant appel à des outils d'investigation de pointe sur le plan expérimental comme sur celui de la modélisation-simulation et d'un environnement collaboratif (Le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université de Montpellier et le CEA/LITEN à Grenoble).

- **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieur ou master en mécanique et simulation numérique
- **Ecole doctorale**
Information, Structures et Systèmes (I2S)
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2023
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
RADJAI Farhang
CNRS - Physique et mécanique des Milieux divisés
- **Chercheur à contacter**
VANSON Jean-Mathieu
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 72 60
jean-mathieu.vanson@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© A.Aubert|CEA

Modélisation multi-échelle de la restructuration du combustible UO₂ pour des réacteurs nucléaires calogènes de petite puissance (SMR) fonctionnant à basse température

DEC/SESC/LEVA



© C. Sabathier et al

Modélisation par champ de phase du transport de la porosité à l'échelle microscopique par évaporation/condensation dans le combustible MOX d'un réacteur nucléaire

DEC/SESC/LEVA

Dans les combustibles nucléaires, lorsque l'accumulation des défauts d'irradiation est accompagnée d'une possibilité limitée de restauration, un changement profond peut se produire dans la microstructure.

Les grains micrométriques sont progressivement remplacés par des grains nanométriques vierges entourés par des pores micrométriques de forme sphérique. Cette nouvelle microstructure, appelée High Burnup Structure (HBS), impacte le comportement du combustible nucléaire sous irradiation, en modifiant des propriétés importantes du combustible, telles que la conductivité thermique et les propriétés élastiques. La nouvelle porosité associée à la HBS induit un gonflement supplémentaire du combustible, pouvant contribuer à l'interaction mécanique pastille-gaine, et engendrer le relâchement des gaz de fission stockés lors de transitoires accidentels hypothétiques (accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) ou d'insertion rapide de réactivité (RIA)). Au vu des températures différentes de fonctionnement du combustible envisagées dans les Small Modular Reactors (SMRs) calogènes, par rapport aux REPs électrogènes du parc français actuel, les modèles disponibles dans les Outils de Calcul Scientifique (OCS) du comportement du combustible nucléaire, qui ont été développés pour des conditions de type REP, ne peuvent pas être extrapolés à l'analyse du combustible des SMRs calogènes. L'inapplicabilité de ces modèles est due au fait qu'ils ont été élaborés en se basant sur des approches empiriques dérivées à partir de données expérimentales obtenues sur des combustibles REP qui ont fonctionné à des températures qui ne sont pas compatibles avec les plages de fonctionnement envisagées pour les SMRs calogènes. Une représentation plus physique est donc préférable, afin de s'affranchir des données expérimentales qui empêchent d'utiliser les prédictions des modèles de la formation de la HBS au-delà de leurs domaines de validité. Ce travail de thèse vise à identifier les mécanismes à l'origine de la restructuration du combustible à base d'oxyde d'uranium, en utilisant une combinaison d'analyse critique de données expérimentales, d'études théoriques et computationnelles avec l'objectif de développer un modèle pour la formation de la HBS et de l'inclure dans la plateforme de simulation du combustible nucléaire sous irradiation du CEA, PLEIADES.

Les trois étapes importantes de la thèse seront :

- Une révision critique de la littérature ouverte et interne au CEA, pour analyser et interpréter les résultats à utiliser dans le travail de thèse.
- Le développement d'un modèle pour l'évolution des défauts ponctuels dans l'oxyde d'uranium sous irradiation, qui décrit l'évolution des quantités d'intérêt à l'échelle microscopique, notamment la concentration de boucles et lignes de dislocations. Son inclusion dans un outil de calcul scientifique de la plateforme PLEIADES est aussi envisagée.
- L'utilisation (et, à l'occasion, l'amélioration) des outils, originalement développés pour la simulation de la recristallisation des métaux, pour la simulation de la restructuration du combustible en HBS, en exploitant les résultats issus du modèle d'évolution des défauts ponctuels et étendus.

Toutes les étapes du travail seront complétées par une comparaison systématique aux résultats expérimentaux et, in fine, le modèle sera utilisé pour l'analyse du combustible des SMRs calogènes en cours de développement au CEA.

Les résultats obtenus dans la thèse seront l'objet de présentations en conférences à l'internationale (par exemple, NuMat – The Nuclear Materials Conference, MMM – Multiscale Materials Modeling Conference, MiNES – Materials in Nuclear Energy Systems), ainsi que de publications dans des revues scientifiques internationales (Computational Material Science, Journal of Nuclear Materials, Journal of the European Ceramic Society). Au sein de l'institut IRESNE (CEA Cadarache), le candidat rejoindra une communauté scientifique pluridisciplinaire sur les matériaux (physique du solide, thermique, mécanique, mathématiques appliquées, thermochimie, thermodynamique) et ouverte à la fois sur la recherche internationale et le monde industriel, aura l'opportunité d'échanger avec des experts impliqués dans les différentes étapes de la conception d'un réacteur nucléaire et utilisera des simulations numériques de pointe à petites et grandes échelles. Il aura enfin la possibilité d'intégrer pour une partie de sa thèse le laboratoire universitaire du directeur de thèse, où il pourra ainsi compléter l'expérience acquise au sein du CEA.

■ Formation recommandée

Master en Physique ou Matériaux, Ecole d'Ingénieur

■ Ecole doctorale

Sciences Fondamentales et Appliquées (EDSFA) – Paris Sciences et Lettres

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

BERNACKI Marc
MINES Paris Tech – CEMEF

■ Chercheur à contacter

BARANI Tommaso
IRESNE – l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 26 21
tommaso.barani@cea.fr

La thèse proposée a pour objectif de développer un modèle de champ de phase décrivant la migration de la porosité de fabrication dans les oxydes mixtes d'uranium-plutonium sous irradiation dans les réacteurs rapides au sodium.

Le modèle prendra en compte les phénomènes d'évaporation et de condensation en tant que force motrice microscopique déplaçant la porosité là où les conditions nécessaires de température locale et de gradient de température sont atteintes pour établir ce mécanisme de transport. Pour fournir une estimation cohérente des différences de pression de vapeur régissant la vitesse d'évaporation (et de condensation), le modèle de champ de phase sera couplé à une description thermodynamique du système ternaire U-Pu-O. Le candidat travaillera sur le développement de la formulation théorique du modèle de champ de phase, ainsi que sur son inclusion dans le cadre d'un solveur d'éléments finis. L'outil informatique sera appliqué pour étudier les conditions rencontrées dans les réacteurs à neutrons rapides prototypiques afin de dériver de nouvelles lois de vitesse de migration des pores à inclure dans les outils de calcul scientifique (OCS) du comportement du combustible utilisés au niveau industrielle, comme par exemple PLEIADES/GERMINAL V3, l'OCS développé dans le service d'accueil au CEA IRESNE.

Les résultats obtenus dans la thèse seront l'objet de présentations en conférences à l'international (par exemple, NuMat – The Nuclear Materials Conference, MMM – Multiscale Materials Modeling Conference, MiNES – Materials in Nuclear Energy Systems, CALPHAD),

ainsi que de publications dans des revues scientifiques internationales (Computational Materials Science, Journal of Nuclear Materials, Journal of Applied Physics, Acta Materialia).

Au sein de l'Institut IRESNE (CEA Cadarache), le candidat rejoindra une communauté scientifique pluridisciplinaire sur les matériaux (physique du solide, thermique, mécanique, mathématiques appliquées, thermochimie, thermodynamique) et ouverte à la fois sur la recherche internationale et le monde industriel. Il/elle aura l'opportunité d'échanger avec des experts impliqués dans les différentes étapes de la conception d'un réacteur nucléaire et utilisera des simulations numériques de pointe à petites et grandes échelles. Pendant une partie de sa thèse, il/elle pourra intégrer le laboratoire universitaire du directeur de thèse à l'École Polytechnique, complétant ainsi son expérience au sein d'un institut de recherche appliqué tel que le CEA avec une approche plus académique offerte par une institution universitaire. Finalement, le candidat aura l'opportunité de se familiariser avec deux des techniques les plus utilisées dans l'analyse de l'évolution des microstructures dans de nombreux champs industriels : le champ de phase et les calculs thermodynamiques par des techniques CALPHAD, tout en développant ses compétences dans ces domaines.

■ Ecole doctorale

Ecole Doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris (IP Paris) – Ecole Polytechnique

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

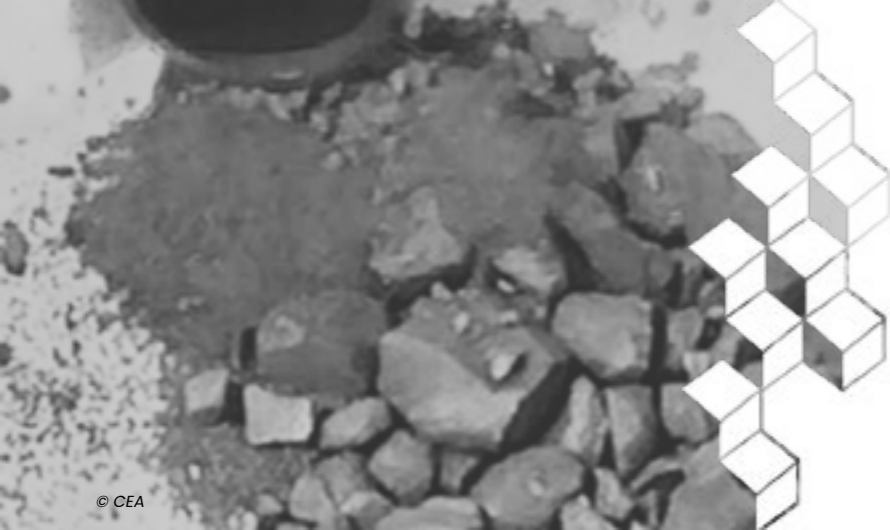
PLAPP Mathis
Ecole Polytechnique – Laboratoire de Physique de la Matière Condensée

■ Chercheur à contacter

BARANI Tommaso
IRESNE – l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 26 21
tommaso.barani@cea.fr

[Retour au sommaire](#)

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Quel couplage thermomécanique pour prédire la fragmentation du combustible nucléaire ?

DEC/SA3E/LAMIR

Lorsqu'il est soumis à une rampe de température, le combustible nucléaire irradié se fragmente et ce d'autant plus que la rampe est rapide.

Ce résultat intuitif ne peut cependant pas être décrit par les codes de comportement du combustible existant au CEA, car ces derniers calculent l'état de contrainte de la pastille combustible de manière statique, c'est à dire avec des équations qui ne dépendent pas du temps. Le but de la thèse est d'aller au-delà de cette limitation en proposant une modélisation, en mécanique élastique, qui puisse rendre compte de l'effet de la vitesse de montée en température. Pour ce faire, on se placera dans une approche thermodynamique, en utilisant le formalisme de Onsager. Le travail de thèse consistera à écrire un modèle théorique du couplage mécanique thermique basé sur des équations dépendant du temps, puis de l'appliquer à une simulation simplifiée de la pastille combustible.

Le candidat devra avoir des connaissances en mécanique et en thermodynamique, idéalement en thermodynamique des processus irréversibles. Il bénéficiera d'un environnement scientifique de haut niveau avec des compétences sur les codes thermomécaniques et le

comportement de la pastille combustible lors d'un transitoire thermique au sein du département d'études des combustibles (Institut IRESNE, CEA-Cadarache) et des compétences sur le formalisme de Onsager apportées par son directeur de thèse.

■ **Formation recommandée**
Master2 / école d'ingénieur

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
GOUPILO Christophe
Paris-Diderot (Paris 7)
LIED

■ **Chercheur à contacter**
DESGRANGES Lionel
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 31 59
lionel.desgranges@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© A.Aubert|CEA

Rôle des propriétés de surface des particules de poudres UO2 sur leur aptitude à l'agglomération et leur comportement rhéologique

DEC/SA3E/LCU

Cette étude s'inscrit dans un contexte de prédiction du comportement à l'écoulement d'une poudre dans le cadre de la fabrication de combustible nucléaire.

Cette problématique est très fréquente dans de nombreux domaines industriels, car le mauvais écoulement d'une poudre peut induire des problèmes tels que le colmatage de conduites, des cadences réduites et la présence d'hétérogénéités dans le produit final.

La thèse proposée portera d'une part sur la description des agglomérats de poudre et d'autre part sur la caractérisation chimique et structurale de leur surface. Ces données structurales et surfaciques des particules de poudre UO2 permettront de mieux comprendre leurs propriétés d'agglomération / désagglomération afin de les relier à leurs propriétés d'écoulement.

Le futur doctorant sera amené à utiliser et développer des moyens expérimentaux (outils d'analyse des particules, mesures de propriétés de surface, caractérisation de l'agglomération, mesures de propriétés rhéologiques) de l'institut IRESNE (CEA-Cadarache).

Ce sujet, bien qu'appliqué aux poudres d'oxyde d'uranium, revêt un caractère générique propre à l'étude des milieux

granulaires. Ainsi, à l'issue de cette thèse le doctorant valorisera ses résultats au travers de publications et participations à des congrès et aura acquis une expertise dans le domaine des milieux granulaires et des propriétés de surface. Ces compétences sont recherchées et valorisables dans un grand nombre de domaines industriels qui utilisent des poudres (pharmacie, agro-alimentaire, métallurgie et matériaux de construction...).

■ **Formation recommandée**
Master chimie du solide, caractérisation de surface, matériaux. Proposition de stage M2 en amont de la thèse.

■ **Université / École doctorale**
Sciences, Ingénierie, Santé (EDSIS) - Université de Lyon

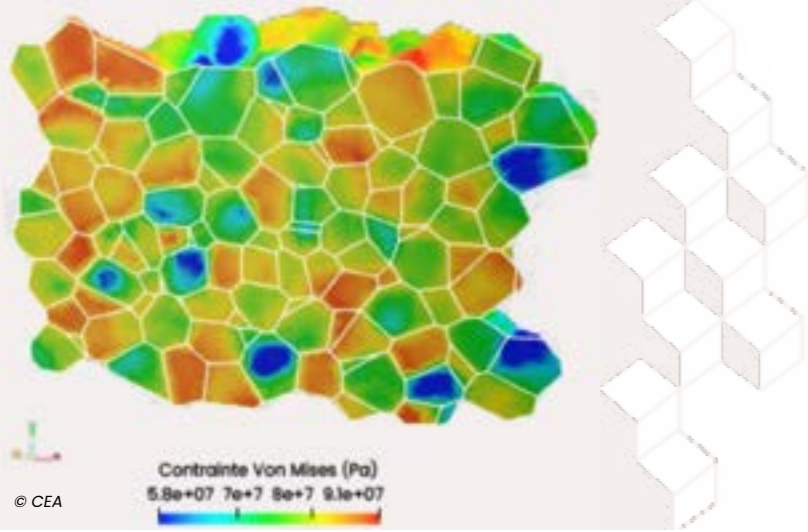
■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
GOUPILO Christophe
Paris-Diderot (Paris 7) - LIED

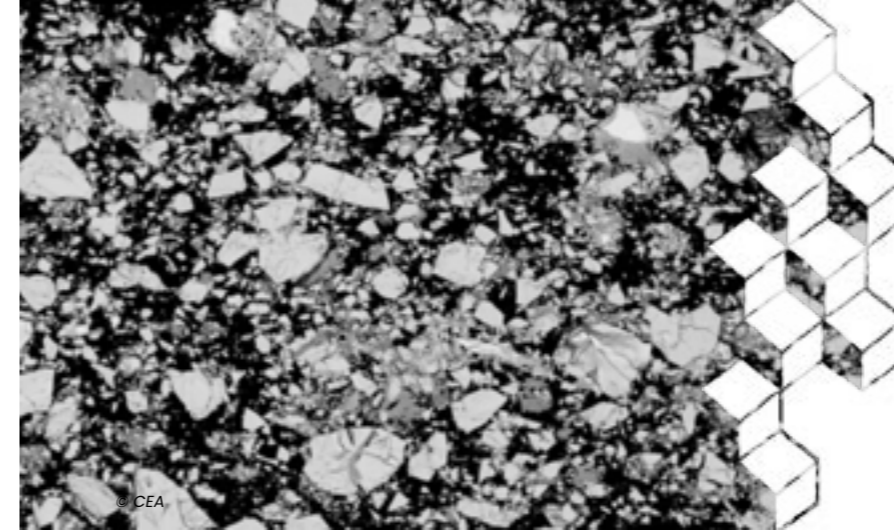
■ **Chercheur à contacter**
ROBISSON Anne-Charlotte
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 43 27
anne-charlotte.robisson@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Simulation multiéchelle de l'impact de la montée des dislocations sur le comportement mécanique de l'UO2 à haute température

DEC/SESC/LM2C



Vers une meilleure connaissance du rôle de la microstructure sur les propriétés thermiques des combustibles nucléaires pour réacteurs de recherche

DEC/SA3E/LCPC

La réduction des rejets de gaz à effet de serre passe par le développement de systèmes de production d'énergie bas carbone incluant le nucléaire. L'acceptabilité du nucléaire impose un haut niveau de sûreté et donc une connaissance approfondie du comportement des combustibles sous irradiation en support au développement des Outils de Calcul Scientifique (OCS).

Un enjeu fort de ces OCS est de permettre aussi une performance accrue du combustible en particulier en terme de flexibilité vis-à-vis du mix énergétique et de comportement dans les situations accidentelles.

Le dioxyde d'Uranium (UO₂), de structure polycristalline, est utilisé comme matériau constitutif des pastilles combustibles des réacteurs nucléaires électrogènes. Le comportement mécanique de l'UO₂ couplé aux effets d'irradiation joue un rôle important dans l'évaluation de l'intégrité de la première barrière de confinement du combustible. Un des enjeux de la connaissance du comportement mécanique du combustible irradié est de pouvoir évaluer les contraintes et déformations s'exerçant dans les grains et à leurs interfaces par la compréhension des phénomènes à l'échelle des hétérogénéités microstructurales du polycristal.

L'objectif principal de la thèse sera de fournir des simulations de référence en support à la modélisation multiéchelle du mécanisme de montée des dislocations, phénomène majeur à l'origine du comportement mécanique du combustible à haute température. Le développement d'un couplage entre un code de dynamique des dislocations (DD) et un code éléments-finis (EF) sera

réalisé afin de décrire au mieux les mécanismes de diffusion et de montée de dislocations. Ensuite, des calculs basés sur ce couplage permettront de quantifier l'impact de la montée sur la microstructure et le comportement viscoplastique du combustible UO₂. Ce travail permettra in fine d'améliorer la modélisation micromécanique continue par la méthode des éléments finis [1],[2] mise en œuvre dans la plateforme de simulation PLEIADES du CEA [3].

Cette thèse sera réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Département d'Etude des Combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache) et l'IM2NP d'Aix Marseille Université. Le Département d'Etudes des matériaux et physico-chimie DRMP du CEA/ISAS et l'UMET de l'Université de Lille seront également associés à cette collaboration. Les travaux de thèse seront menés à l'IRESNE de Cadarache au sein du Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles dans un environnement donnant accès à une grande expertise sur la modélisation multiéchelle des matériaux. Les travaux de recherche seront valorisés par des publications et des participations à des conférences internationales dans le domaine des matériaux.

■ Formation recommandée

Simulation numérique en mécanique des matériaux

■ Ecole doctorale

Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPON) – Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/11/2023

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

MICHEL Bruno
CEA

■ Chercheur à contacter

PIVANO Adrien
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 79 68
adrien.pivano@cea.fr

Les réacteurs nucléaires expérimentaux, qui permettent de soumettre des matériaux à des irradiations aux neutrons, présentent des densités de puissance très importantes. Ceci impose l'utilisation d'éléments combustibles avec une charge très élevée en matière fissile, historiquement obtenue grâce à un fort enrichissement en 235U.

En raison d'accords internationaux de non-prolifération, il est désormais nécessaire de développer des combustibles moins enrichis, et donc maximisant la concentration en uranium. Une solution majoritairement retenue et étudiée repose sur des particules d'U₃Si₂ dispersées dans une matrice en aluminium. Or, sous irradiation, un composé d'interaction U(Al,Si)_{3±x} se forme. Sa faible conductivité thermique tend à faire augmenter la température du combustible, dégradant ainsi son comportement en service.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la connaissance expérimentale de l'évolution de la conductivité thermique des combustibles dispersés U₃Si₂-Al lors de leur irradiation, et in fine de corréliser leur microstructure à leurs propriétés thermiques, qui seront mesurées à différentes échelles. Pour cela, des plaques U₃Si₂-Al non irradiées seront soumises à des traitements thermiques destinés à obtenir des fractions variables de composé U(Al,Si)_{3±x} et leurs propriétés thermiques seront mesurées et corrélées à la fraction et à la répartition volumique de ce composé.

Une étude spécifique sera en outre menée autour de la synthèse et de la mesure des propriétés thermiques de composés U(Al,Si)_{3±x} sous forme amorphe, telle qu'observée en réacteur. Les données acquises au cours de cette thèse alimenteront la modélisation du comportement sous irradiation des combustibles dispersés U₃Si₂-Al : elles serviront notamment de données de validation pour les modèles et les codes de calculs.

Ce travail se déroulera au Département d'Etudes des Combustibles (Institut IRESNE, CEA Cadarache). Il permettra au (à la) doctorant(e) d'acquérir des compétences en fabrication et caractérisation des combustibles (microstructure et propriétés thermiques) qui seront transposables à d'autres matériaux. Il (elle) sera également amené(e) à utiliser des moyens expérimentaux « lourds » tels que des lignes de lumière synchrotron et des faisceaux d'ions. Il/elle aura la possibilité de présenter ses travaux à des conférences nationales et internationales, ainsi qu'à travers la publication d'articles.

■ Formation recommandée

Master 2 en Sciences des Matériaux

■ Ecole doctorale

Chimie Mécanique Matériaux Physique (C2MP) – Université de Lorraine

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

VERNIERE Anne
Université de Lorraine – CNRS – Institut Jean Lamour (UMR 7198)

■ Chercheur à contacter

KLOSEK Vincent
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 59 91
vincent.klosek@cea.fr

[Retour au sommaire](#)

[Retour au sommaire](#)



© A.Aubert|CEA

Vers une pastille de combustible nucléaire optimisée pour résister aux gradients de température

DEC/SA3E/LAMIR

Pour réussir la transition énergétique, la production d'énergie électrique d'origine nucléaire devra s'adapter aux variations de production des énergies renouvelables.

Lors des montées en puissance d'un réacteur nucléaire, le risque de rupture des crayons combustibles est accru si les pastilles de combustible qu'ils contiennent sont fracturées. Le CEA développe un prototype de pastille qui ne se rompt pas lors des montées en puissance d'un réacteur.

L'objectif de cette thèse est de perfectionner le prototype déjà élaboré au cours d'une étude précédente pour aller vers une pastille prototype réalisée en dioxyde d'uranium. Le candidat devra adapter la géométrie initiale en deux dimensions à une forme de pastille en 3 dimensions qui soit fabricable avec les outils du département d'études des combustibles (Institut IRESNE - CEA Cadarache), notamment la nouvelle plateforme de fabrication additive adaptée au dioxyde d'uranium. Il devra ensuite participer à la fabrication de prototypes qui seront ensuite testés dans un gradient de température généré sur la plateforme de chauffage laser du département.

Le candidat devra avoir des connaissances en sciences des matériaux et interagir

avec plusieurs équipes de recherche spécialisées en simulation numérique, en fabrication de céramique et en expérimentation en température.

■ **Formation recommandée**
Sciences des Matériaux

■ **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352)
Aix-Marseille Université

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
DESRANGES Lionel
CEA - IRESNE

■ **Chercheur à contacter**
DESRANGES Lionel
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 31 59
lionel.desranges@cea.fr

Département d'Études des réacteurs

Le Département d'Études des Réacteurs (DER) est une unité de recherche appliquée d'environ 230 salariés (dont 80 % sont des chercheurs et ingénieurs, et 20 % sont des techniciens). Le département accueille annuellement environ 50 doctorants, post-doctorants et apprentis.

Les principales activités du DER concernent :

- La préconception d'ensemble de réacteurs nucléaires et systèmes énergétiques innovants, et le soutien au nucléaire industriel actuel (FRAMATOME, EDF, ORANO, ...),
- la simulation numérique,
- l'exploitation du réacteur expérimental CABRI et la préparation de l'exploitation du futur réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH),
- l'expérimentation en réacteurs de recherche,
- l'instrumentation nucléaire innovante.

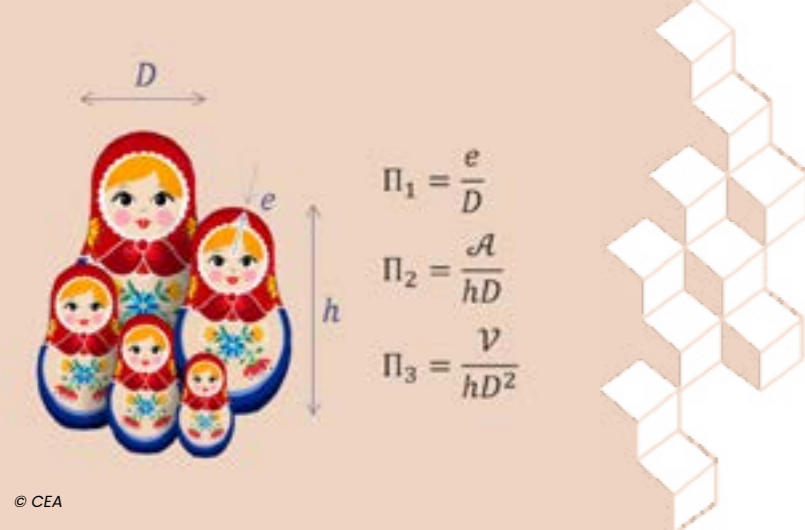
Le DER comprend quatre services:

- Le Service d'Études des Systèmes Innovants (SESI),
- Le Service de Physique Expérimentale, d'essais en Sécurité et d'Instrumentation (SPESI),
- Le Service de Physique des Réacteurs et du Cycle (SPRC),
- Le Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz (SERJH).



© A.Aubert|CEA

[Retour au sommaire](#)



Analyse dimensionnelle pilotée par les données pour la conception de systèmes passifs de sûreté nucléaire

DER/SESI/LCOS

La plupart des nouveaux concepts de réacteur à eau pressurisée proposent des boucles de convection naturelle pour évacuer la chaleur résiduelle, en particulier ceux de petite ou moyenne puissance (SMR).

Pour s'assurer que ces systèmes innovants démarreront et fonctionneront comme prévu dans toute la gamme des conditions opératoires envisagées, on a recours à des essais dans des maquettes à échelle réduite. Seule une similitude partielle étant généralement possible avec ces maquettes, il faut déterminer les nombres dimensionnels prépondérants pour maîtriser le choix des phénomènes dont la représentativité sera sacrifiée. Or, cette détermination est difficile en présence de phénomènes multi-physiques, dynamiques, non-linéaires ou couplés, aboutissant à des dizaines de groupements adimensionnels que l'on ne peut hiérarchiser.

Dans ce travail de thèse, on se propose tout d'abord de générer une collection de données numériques caractérisant un système d'évacuation de la puissance résiduelle par convection naturelle (simulations Cathare, synthèse d'essais existants).

Cette collection de données viendra ensuite alimenter un algorithme d'identification automatique des

nombres adimensionnels prépondérants, que le doctorant devra développer en s'inspirant de techniques de type machine learning, pénalisation, décomposition en valeurs singulières...

L'algorithme sera appliqué à des boucles et dispositifs fonctionnant en convection naturelle tels que ceux étudiés au DER/SESI de l'institut CEA/IRENE.

■ Formation recommandée

M2 data-science, école d'ingénieur généraliste

■ Date souhaitée de début de thèse

01/09/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Chercheur à contacter

CARDOLACCIA Jerome
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 79 29
jerome.cardolaccia@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Analyse et simulation thermohydraulique multi-échelles des transitoires dimensionnants d'un concept innovant de réacteur nucléaire calogène

DER/SESI/LCOS

Le Laboratoire de préconception et optimisation des systèmes du CEA/IRENE à Cadarache travaille sur des concepts innovants de réacteurs nucléaires à des fins de décarbonation de secteurs industriels et urbains (électricité flexible, chaleur, froid, carburant de synthèse, hydrogène).

L'un de ces concepts innovants est le réacteur à eau passif ARCHEOS dédié à la fourniture de chaleur (calogène) et pensé pour être intrinsèquement sûr et simple d'exploitation.

L'enjeu de la thèse est de comprendre et d'analyser le fonctionnement thermohydraulique de ce réacteur dont la particularité est de fonctionner complètement en circulation naturelle, ce qui est inédit dans le domaine. Cela passera par l'identification de scénarios normaux et accidentels et par leur simulation à l'échelle du réacteur complet.

Des propositions d'évolution du concept pourront émerger à la suite de cette recherche. Ces simulations s'accompagneront d'une analyse physique approfondie des phénomènes thermohydrauliques pouvant intervenir au cours des scénarios étudiés, qui seront mis en évidence par la simulation à différentes échelles : du 1D au 3D CFD en passant par le 3D poreux. Ceci se fera à l'aide des logiciels CATHARE3 et Neptune_CFD.

Travailler sur un tel concept innovant de réacteur nucléaire représente une très belle opportunité pour un(e) doctorant(e). Cette expérience sera formatrice sur de nombreux sujets : la sûreté nucléaire, la conception innovante, la simulation thermohydraulique à plusieurs échelles et notamment avec le code CATHARE3 très utilisé dans la recherche et l'industrie nucléaire française, la physique des réacteurs en régimes transitoires.

■ Formation recommandée

Diplôme d'ingénieur(e) ou Master 2 recherche

■ Ecole doctorale

Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPON) - Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

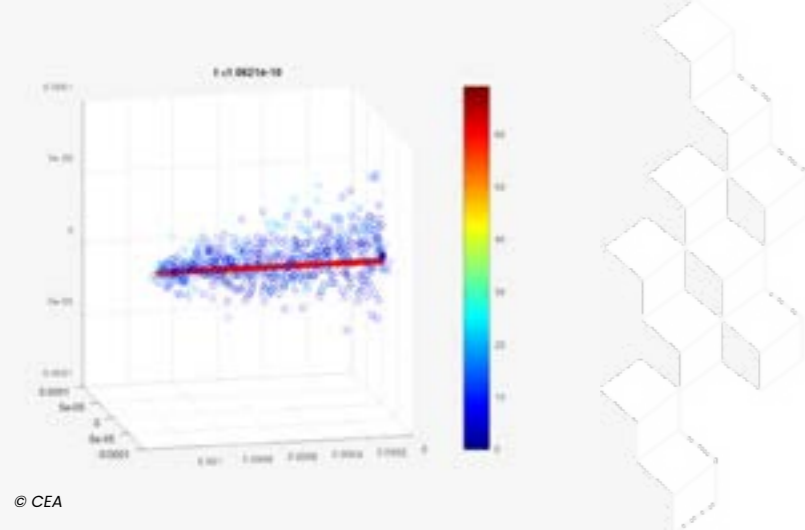
■ Directeur de thèse

NGUYEN Frederic
CEA

■ Chercheur à contacter

MATTEO Laura
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 43 46
laura.matteo@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Conception et réalisation d'un détecteur neutronique optique fonctionnant à haute température. Application à un programme expérimental dans le réacteur JOYO

DER/SPESI/LDCI

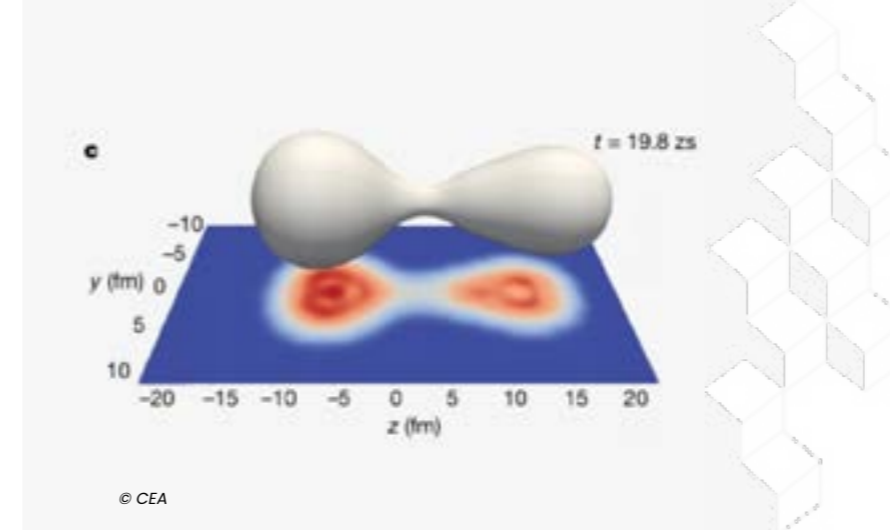
Dans le cadre du développement des réacteurs rapides de quatrième génération à caloporteur sodium, le Laboratoire de Dosimétrie, Capteurs et Instrumentation du CEA/IRENE Cadarache travaille sur des systèmes de mesure neutronique innovants capable de résister à des températures de l'ordre de 600°C et insensibles aux phénomènes parasites qui apparaissent à ces régimes.

Récemment, un nouveau type de détecteur de neutrons à signal optique (DNO) a été développé au laboratoire. Malgré une interprétation des signaux plus complexe, ce dispositif a l'avantage d'être miniaturisable et n'est intrinsèquement pas soumis aux problèmes de décharges partielles et de courant de fuite qui apparaissent sur les chambres à ionisation en température.

prévu à partir de 2026.

On propose de poursuivre le développement théorique et expérimental des DNO pour les adapter à la haute température. Pour cela, le doctorant développera un modèle pour simuler de la réponse du détecteur. Le doctorant travaillera sur les sections efficaces d'interaction ion lourd-gaz de remplissage ainsi que sur un modèle collisionnel radiatif pour prédire les spectres d'émissions et leur dynamique temporelle. Une partie du travail consistera à dimensionner un détecteur prototype et à le tester à haute température au sein du réacteur TRIGA du JSI.

In fine, la qualification du détecteur fera partie d'un programme d'essais dans le réacteur de recherche JOYO



Description théorique de la fission des noyaux impairs et impairs-impairs par la méthode TDGCM

DER/SPRC/LEPH

La fission nucléaire est le processus par lequel un noyau lourd se scinde en deux voire trois fragments, phénomène physique exploité dans les réacteurs nucléaires.

Les données nucléaires de fission sont donc de grande importance pour l'étude et le développement des réacteurs. Alors que les noyaux composés d'un nombre impair de protons et/ou de neutrons représentent les trois quarts de la charte des nucléides, il n'existe pas de modèle théorique microscopique, complètement quantique et cohérent, décrivant leur fission.

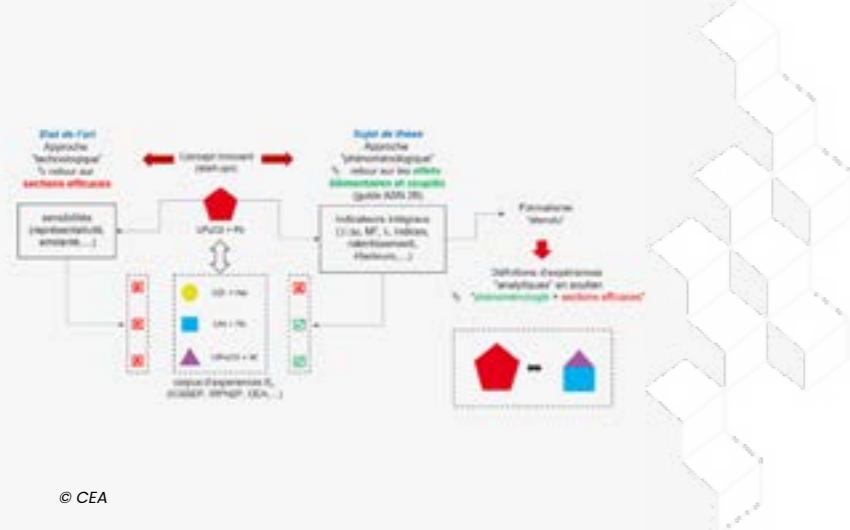
On se propose dans cette thèse de développer un tel modèle sur la base de la méthode de la coordonnée génératrice dépendante du temps (TDGCM) [1,2,3]. Le but est d'obtenir une description microscopique et quantique des rendements de fission primaires et du partage de l'énergie disponible à la scission pour tout type de noyaux fissionnants, y compris ceux inaccessibles à la mesure.

Le travail du doctorant consistera à développer des outils formels et numériques visant à générer des surfaces potentielles de fission et d'étudier la dynamique du noyau sur de telles surfaces. Le doctorant développera des

compétences en physique nucléaire théorique, dérivations analytiques, implémentation numérique, calcul de haute performance et analyse de données. Un stage préalable de 6 mois est proposé par le laboratoire d'accueil.

[1] D. Régnier et al, Phys. Rev. C 93, 054611 (2016)
 [2] D. Régnier et al, Computer Physics Communications 225 (2018) 180-191
 [3] L. M. Robledo et al 2019 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 46 013001

- **Formation recommandée**
Physique nucléaire, physique théorique
- **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352)
Aix-Marseille Université
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/09/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
CHEBBOUBI Abdelhazize
CEA
- **Chercheur à contacter**
BERNARD Rémi
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
remi.bernard@cea.fr



© CEA

Développement d'indicateurs de similarité pour la validation neutronique. Application aux réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb

DER/SPRC/LEPH

La validation des outils de simulation passe par la comparaison avec l'expérience pour l'ensemble des valeurs d'intérêt pour la physique des réacteurs.

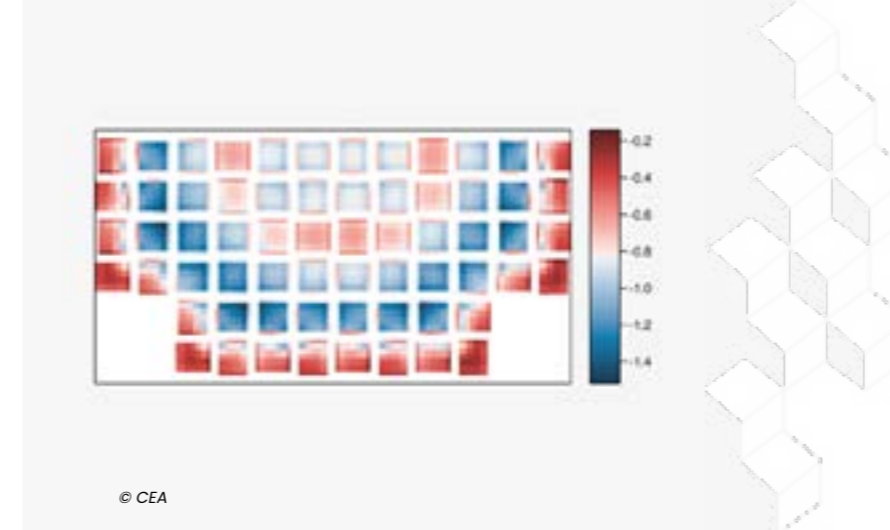
Au niveau de la neutronique, on dispose de bases de données nationale et internationale (IRPhE à l'OCDE/AEN notamment) qui contiennent un ensemble de configurations sur lesquelles ces comparaisons sont possibles. Dans le cas où l'on souhaite s'assurer du caractère prédictif des outils de simulation pour un concept de cœur particulier, il est nécessaire de sélectionner les expériences de validation pertinentes selon un critère de «similarité» ou de «représentativité». Pour cela, il est possible d'utiliser des calculs de sensibilités aux paramètres neutroniques (sections efficaces par exemple) et d'en déduire des estimateurs ou indicateurs mesurant un degré de similarité, obtenus par intégration de différentes grandeurs.

À ce jour, on dispose de peu d'estimateurs utilisés pour faire le tri de manière «efficace» entre plusieurs configurations. Dans cette thèse, on se propose de développer des estimateurs aux plus proches des phénomènes physiques (ralentissement des neutrons, spectre neutronique, libres

parcours moyens, etc.) pour enrichir les outils de sélections tels que NDASt et permettre de mieux discriminer les expériences entre-elles. L'utilisation de tels estimateurs devrait permettre de mieux identifier les phénomènes qui ne sont pas couverts par les bases de données existantes. À partir de ce constat, de nouvelles expériences pourront être proposées pour combler les manques et élargir le domaine de validation à des concepts qui ne sont pas encore couverts. Une application spécifique sera faite à un concept de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb.

- **Formation recommandée**
Ecole Ingénieur Nucléaire, Master 2 Recherche Energie Nucléaire
- **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352) Aix-Marseille Université
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
BUIRON Laurent
CEA
- **Chercheur à contacter**
SAUZEDDE Thibault
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 26 02
thibault.sauzedde@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Développement d'une méthode de propagation d'incertitudes dans une modélisation couplée neutronique-thermohydraulique de cœurs de réacteurs à plaques

DER/SPRC/LPN

Cette thèse propose de tirer parti des fonctionnalités du code neutronique multi-filière de nouvelle génération APOLLO3® pour proposer un schéma de calcul Best-Estimate capable de rendre compte des effets de couplage neutronique-thermohydraulique spécifiques des petits cœurs de REP à plaques.

En effet, APOLLO3® dispose de capacités de couplage avancés avec le code de thermohydraulique cœur FLICA5. Actuellement, les seules modélisations disponibles et utilisables pour des calculs couplés neutronique-thermohydraulique des cœurs à plaques sont en représentation multi-ID, à l'échelle sous-assemblages, relativement grossière. Certaines approximations ont peu d'importance du point de vue neutronique, mais leur bonne représentation est essentielle du point de vue thermohydraulique, notamment pour l'équilibrage des débits.

Dans cette thèse il est proposé de développer une représentation fine du cœur du point de vue thermohydraulique, avec FLICA5, couplée à un schéma Best-Estimate pour la neutronique avec APOLLO3®. Cette description, de type jumeau numérique, devrait permettre à la fois d'évaluer précisément l'effet des contre-réactions thermohydrauliques et de propager rigoureusement les incertitudes liées aux différentes données : bilans matières, géométries des

éléments combustibles et absorbants, données nucléaires.

- **Formation recommandée**
Master / diplôme d'ingénieur en neutronique, ou physique des réacteurs, ou thermohydraulique
- **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352) Aix-Marseille Université
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
FOISSY Martin
CEA
- **Chercheur à contacter**
FOISSY Martin
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 75 39
martin.foissy@cea.fr

[Retour au sommaire](#)

Développement d'une méthode de propagation d'incertitudes de type fonctionnel sur la puissance résiduelle

DER/SPRC/LPN

La caractérisation de l'énergie dégagée par la désintégration des radionucléides présents dans le combustible usé et déchargé des réacteurs est essentielle pour le design, la sûreté et l'analyse du stockage, du transport et des systèmes de dépôt.

Peu de mesures de cette puissance résiduelle sont aujourd'hui disponibles. En outre, les valeurs expérimentales disponibles ne permettent pas de couvrir l'étendue des possibilités de combinaisons entre paramètres (taux de combustion au moment du déchargement – enrichissement en ^{235}U – temps de refroidissement – paramètre de design du combustible – conditions opérationnelles – applications spécifiques). L'estimation de la puissance résiduelle est donc principalement basée sur des simulations.

L'évaluation de l'incertitude associée à l'estimation de la puissance résiduelle revêt un aspect important dans l'objectif d'accéder à une prédiction fiable. De nombreux efforts ont été menés afin de bien évaluer les biais et incertitudes venant des données nucléaires telles que les sections efficaces, paramètres importants en entrée des simulations. En revanche, les études concernant les incertitudes de nature épistémique (incertitude de fabrication de certains composants, erreur de lecture ou de réglage de structures mobiles, ...) sont plus rares. Parmi ces dernières, on peut distinguer le traitement de dépendances complexes de paramètres d'entrée de type scalaire, bien pris en compte aujourd'hui, et ceux de type fonctionnel, s'exprimant sous forme d'une fonction, très peu explorés.

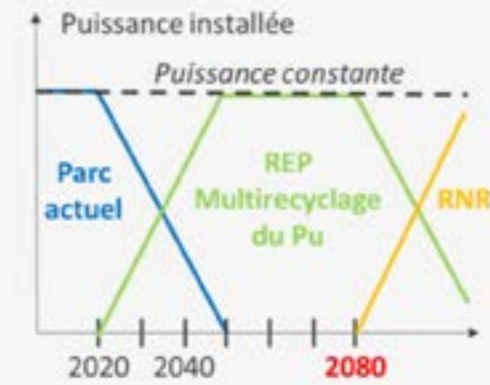
Parmi ces dernières, on peut distinguer le traitement de paramètres d'entrée fixes, indépendants du temps, et le traitement de paramètres d'entrée variables (ou fonctionnels), évoluant au cours de l'exploitation du réacteur. Les incertitudes dues au processus de fabrication appartiennent aux premier type de paramètres. Elles sont aujourd'hui bien prises en compte, malgré les inter-dépendances

spatiales entre les composants d'un élément combustible qui demandent quelques subtilités de simulation. Les incertitudes induites par l'historique d'exploitation du cœur font partie du second type de paramètres. Cet historique regroupe plusieurs paramètres inter-corrélés (puissance de fonctionnement, mouvement des absorbants, évolution du cœur, ...), amenés à être modifiés en fonction du temps et impactant la valeur de nombreuses observables d'intérêt dont la puissance résiduelle. Les modèles utilisés aujourd'hui dans les outils de simulation utilisés à l'échelle industrielle ne permettent pas d'estimer cet impact et de proposer un nouveau d'incertitude validé.

Dans ce travail de thèse, on se propose d'étudier l'impact sur la puissance résiduelle des incertitudes associées aux paramètres d'entrée présentant des dépendances fonctionnelles. On se focalisera tout particulièrement sur l'historique d'irradiation des réacteurs (à eau) et les paramètres corrélés. Une première partie sera dédiée au développement d'un modèle de substitution pour l'estimation de la puissance résiduelle et la quantification des incertitudes des variables aléatoires fonctionnelles. Une deuxième partie sera consacrée au développement d'une méthode d'analyse de sensibilité pour le modèle de substitution développé. Enfin, une troisième partie concernera le développement d'une méthode inverse de quantification des incertitudes des paramètres de modélisation opérationnels.

Le doctorant sera hébergé dans une unité de recherche en physique des réacteurs de l'institut CEA IRESNE situé à Cadarache où il collaborera avec d'autres doctorants et spécialistes du domaine.

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Développement de méthodes d'optimisation avancées pour les scénarios électronucléaires

DER/SPRC/LE2C

L'étude des évolutions possibles du parc français d'installations nucléaires s'appuie sur des simulations de scénarios électronucléaires.

Le scénario simule avec précision les différents flux de matière du cycle combustible, depuis l'extraction des matières premières, en passant par la fabrication du combustible, l'irradiation en cœur, le refroidissement des combustibles irradiés, leur retraitement éventuel et la mise aux déchets. Le scénario est un formidable outil d'aide à la décision. En revanche, il est extrêmement sensible aux hypothèses initiales considérées, hypothèses entachées d'incertitudes fortes. Les méthodes de calcul de scénarios utilisées aujourd'hui ne permettent pas d'absorber les variations d'hypothèses dues à ces incertitudes.

Pour surmonter cette difficulté, un nouveau champ de recherche a vu le jour ces dernières années, portant sur la robustesse et la résilience des scénarios. On ne cherche alors plus à quantifier les performances d'un scénario figé, mais sa capacité à être rectifié en cas de changement d'objectif ou de contrainte (une variation de la puissance installée par exemple). L'application de ce genre de méthodes demande un grand nombre

de calculs, dont la plupart mène à des scénarios non viables.

L'enjeu du travail de thèse est de s'inspirer des méthodes d'optimisation utilisées dans le domaine de la recherche opérationnelle et de la logistique afin de mettre au point des méthodes performantes de production rapide de jeux de données de simulation pour les scénarios. Ces jeux de données générés devront correspondre à des scénarios optimaux pour un ensemble d'objectifs donnés. On pourra alors identifier les scénarios capables de répondre à différents objectifs, et quantifier dans quelle mesure ils peuvent être modifiés pour répondre à de nouvelles contraintes. Dit autrement, ce travail de thèse participe à l'élaboration de scénarios résilients face aux incertitudes de demain.

■ Ecole doctorale

Ecole Doctorale Informatique et Mathématiques (InfoMaths) - Université de Lyon

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

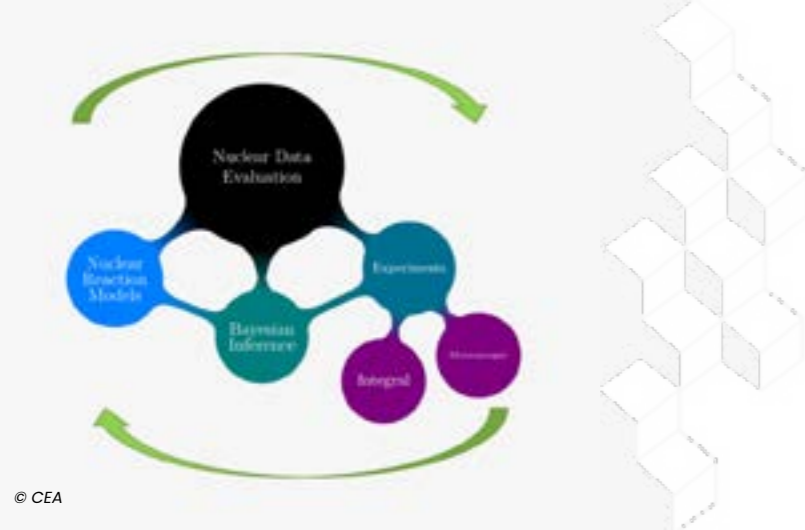
■ Directeur de thèse

HADJ HAMOU Khaled
INSA

■ Chercheur à contacter

TIREL Kévin
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
kevin.tirel@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Développement d'une approche globale de validation des codes de neutronique basée sur l'inférence bayésienne et les techniques de Machine Learning

DER/SPRC/LEPH

L'évaluation des données nucléaires avec la production de fichiers internationaux intégrés dans une bibliothèque internationale comme la bibliothèque européenne (JEFF) est d'importance majeure pour l'ensemble des calculs de systèmes et réacteurs nucléaires actuels et futurs.

L'évaluation et la maîtrise des incertitudes associées à ces données nucléaires est une tâche particulièrement délicate qui fait intervenir des résultats d'expériences « intégrales » et requiert l'emploi de techniques d'inférence bayésienne avancées.

L'objectif de cette thèse est de développer une approche de VVQI/T (Vérification, Validation, Quantification d'Incertitudes et Transposition) des codes de calcul neutronique du CEA qui prenne en compte l'ensemble des sources d'incertitudes (données nucléaires, données géométriques et matérielles, approximations de modèles,...) qui interviennent dans l'équation du transport des neutrons.

Pour traiter ces incertitudes de nature aléatoires et épistémiques, on aura recours, conjointement, au cadre bayésien standard et aux méthodes d'apprentissages machine récentes (Deep Learning).

En particulier, cette thèse contribuera au travail délicat d'assimilation de données issues de mesures intégrales telles que celles disponibles dans les bases

internationales de type IRPhE. Ce travail est essentiel à la validation de la nouvelle bibliothèque européenne JEFF4.

■ Formation recommandée

Physique nucléaire, physique théorique

■ Ecole doctorale

Physique et Sciences de la Matière (ED352)
Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

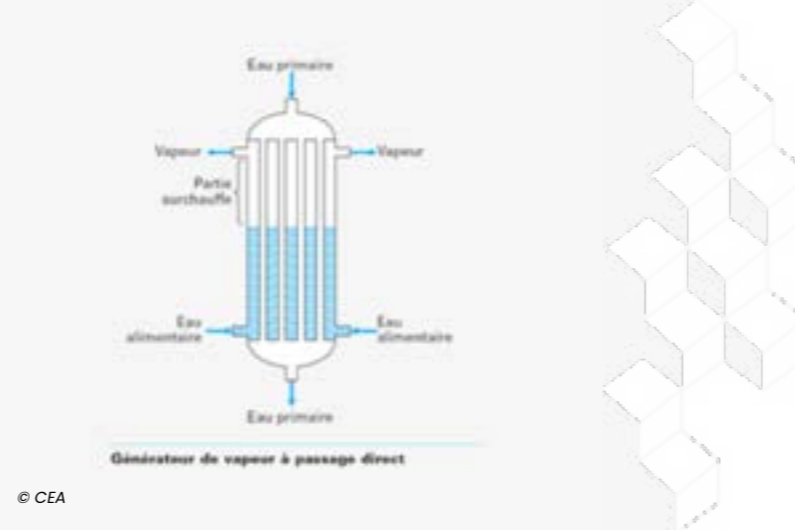
■ Directeur de thèse

NOGUERE Gilles
CEA

■ Chercheur à contacter

PALAU Jean-Marc
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 72 96
jean-marc.palau@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Dynamique d'un cycle à vapeur surchauffée pour la cogénération électricité-chaaleur avec service réseau analyse de stabilité et pilotage de la flexibilité

DER/SESI/LEMS

Cette thèse a pour objectif de développer une méthodologie d'étude de stabilité et de pilotage adaptée aux particularités du cycle de conversion d'énergie d'un réacteur nucléaire de petite puissance (Small Modular Reactor) fonctionnant en cogénération avec service réseau.

Le travail du doctorant portera sur le pilotage du générateur de vapeur (GV) pour une technologie donnée, avec comme première étape, le développement d'un modèle dynamique 1D de ce composant et l'étude de stabilité de l'écoulement. Différentes stratégies de contrôle-commande seront explorées par couplage progressif du GV avec le système de conversion d'énergie et le circuit primaire : les conditions d'un fonctionnement en suivi de fréquence ou de charge seront examinées, aussi bien en mode électrogène qu'en mode cogénération. L'approche cherchera à quantifier le gain qui peut être attendu de techniques de contrôle avancé, faisant notamment appel à de l'apprentissage (machine learning). Différents outils de modélisation seront employés, dont Dymola, Matlab ainsi que des outils internes CEA ou libres.

La thèse bénéficie d'une double direction universitaire et se déroulera dans le Service d'Etudes des Systèmes Innovants de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires du centre CEA de Cadarache.

Le doctorant développera des compétences en conversion d'énergie, thermohydraulique, contrôle-commande (composante forte de la thèse) et intelligence artificielle.

■ Formation recommandée

Ingénieur école généraliste, Master en automatique avancée

■ Ecole doctorale

Energie et Environnement (E2) - Perpignan

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

GRIEU STÉPHANE
CNRS - Laboratoire PROMES-CNRS (UPR 8521)

■ Chercheur à contacter

ALPY Nicolas
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les
Systèmes Nucléaires pour la production
d'Énergie bas carbone
04 42 25 29 18
nicolas.alpy@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Etude et utilisation de verres à l'uranium pour la détection des neutrons par voie optique

DER/SPESI/LDCI

Le Laboratoire de Dosimétrie, Capteurs et Instrumentation du CEA Cadarache, développe, fabrique et exploite des détecteurs de flux neutroniques qui sont utilisés à proximité immédiate ou à l'intérieur des cœurs des réacteurs nucléaires.

En plus des détecteurs classiques (chambres à fissions, collecteurs...), le LDCI mène des recherches actives sur des voies de mesures innovantes telles que des détecteurs optiques, semi-conducteurs, scintillateurs fibrés... Dans cette thèse, le laboratoire souhaite explorer le potentiel de verres dopés à l'Uranium. Ces verres sont connus pour produire une vive fluorescence sous différents rayonnements. L'idée maîtresse est d'essayer d'exploiter cette fluorescence pour détecter les réactions de fission qui sont induites dans le verre lorsqu'il est exposé à un flux de neutrons. Cela permettrait de développer une nouvelle génération de détecteurs de neutrons par voie optique à mi-chemin entre une chambre à fission et un scintillateur.

Le travail de thèse sera articulé autour de deux grands axes :

- d'une part la compréhension fine des mécanismes de fluorescence, ainsi que la synthèse de verre à l'uranium aux propriétés optimisées pour nos besoins (sensibilité, spectre d'émission,

vecteur isotopique...). La synthèse sera effectuée dans des laboratoires partenaires ;

- d'autre part le développement d'une instrumentation dédiée, probablement sous la forme de fibres optiques, pour tester ces prototypes en réacteur.

■ Formation recommandée

Instrumentation détecteur, interaction rayonnement matière, neutronique, chimie des matériaux, optique

■ Ecole doctorale

Physique et Sciences de la Matière (ED352) Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

TISSEUR David
CEA

■ Chercheur à contacter

LLIDO Olivier
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 73 05
olivier.llido@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Etude expérimentale des phénomènes physiques dans une chambre à fission

DER/SPESI/LDCI

Depuis une quinzaine d'années, le Laboratoire de Dosimétrie Capteur et Instrumentation (LDCI) du CEA/IRESNE Cadarache travaille sur l'optimisation et la fiabilisation des chambres à fission, des détecteurs neutroniques essentiels pour l'opération et la sûreté des réacteurs électrogènes et pour la mise en œuvre d'expériences en réacteur de recherche, notamment le futur Réacteur Jules Horowitz.

Ces applications entraînent une demande accrue pour des détecteurs innovants, fiables et parfaitement maîtrisés, en particulier vis-à-vis de la correction des défaillances du détecteur et l'amélioration la précision des mesures via le développement de procédure de calibration.

Pour être à même de répondre à ces besoins, le LDCI propose une thèse sur l'étude expérimentale des chambres à fission à l'aide d'une chambre, Corex. Ce dispositif modulaire, conçu lors d'une thèse précédente pour l'étude de la recombinaison colonnaire, présente l'avantage de pouvoir fonctionner sans réacteur, ce qui en simplifie l'accès et la manipulation.

Le doctorant devra utiliser ce dispositif pour explorer de manière paramétrique les phénomènes physiques qui interviennent dans la construction du signal afin de mettre à jour et qualifier les modèles et outils de calcul correspondants. Ces outils permettront de poursuivre des études théoriques sur les modes de défaillance des chambres à fission ainsi que leur calibration en mode fluctuation et courant.

A travers cette recherche, le doctorant développera des compétences en modélisation et mise en œuvre d'instrumentation nucléaire.

■ Formation recommandée

Master-2 ou école d'ingénieur

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Directeur de thèse

FILLIATRE Philippe
CEA

■ Chercheur à contacter

DE IZARRA Grégoire
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 29 92
gregoire.DEIZARRA@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Implications d'une gestion par lots du combustible de réacteurs nucléaires à sels fondus

DER/SPRC/LE2C

De nombreux concepts de réacteurs à sels fondus s'appuient sur une gestion du sel dite continue qui consiste à déverser et soutirer continuellement une quantité de sel combustible du cœur pour compenser la perte de réactivité due à l'épuisement du combustible.

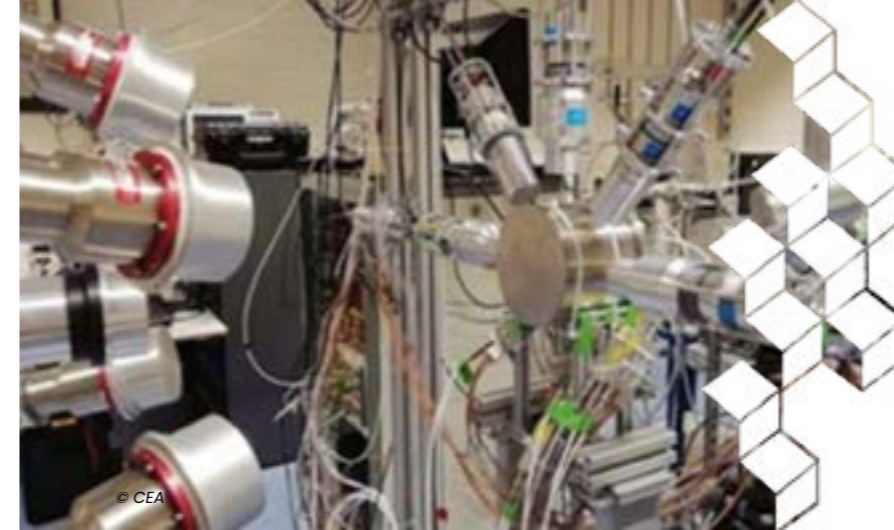
Dans cette thèse, on se propose de repenser la conception des réacteurs à sels fondus en proposant une gestion alternative dite par lots. Cette nouvelle gestion consiste à prélever et charger une fraction du volume du cœur après un certain temps d'irradiation et durant une phase de maintenance du réacteur. L'objectif d'une telle gestion n'est plus d'optimiser les performances en considérant que les systèmes externes seront à même de répondre aux besoins du réacteur, mais de prendre en compte certaines contraintes technologiques extérieures à la machine. Ce changement de paradigme soulève des interrogations que ce soit au niveau de la neutronique, du cycle du combustible, de la chimie des sels ou encore des notions de sûreté/criticité.

Le doctorant s'attachera dans un premier temps à évaluer l'impact neutronique d'une gestion par lots, au moyen d'études de sensibilité (performances d'incinération/régénération, temps de cycle, volume/masse d'alimentation). S'en suivront des études incorporant les contraintes du cycle

comme la fabrication du sel combustible (solubilité des actinides) ou encore le traitement du sel usé (temps de traitement, temps de refroidissement, procédé de traitement) via des calculs de scénario. A terme le doctorant aura développé une méthodologie capable de caractériser un réacteur à sels fondus selon les performances neutroniques, le respect des contraintes imposées par le cycle et les limites inhérentes à la chimie des sels. La démarche pourra ensuite être appliquée à différents types de réacteurs (incinérateur, régénérateur, convertisseur) afin de quantifier les implications d'une gestion par lot d'un RSF par rapport à une gestion continue.

Nous recherchons un candidat de niveau BAC +5 avec une formation en physique des réacteurs. La thèse permettra au candidat de se développer des compétences en conception d'un réacteur de quatrième génération. Il/elle participera ainsi à la communauté scientifique travaillant sur ces systèmes complexes, ce qui lui ouvrira la voie à un emploi dans un laboratoire de recherche.

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Mesures des corrélations entre observables de fission pour contraindre les modèles de désexcitation des fragments de fission

DER/SPRC/LEPH

Le Laboratoire d'études de physique du CEA/IRENE à Cadarache développe depuis une dizaine d'années un code Monte-Carlo dénommé FIFRELIN capable de simuler les noyaux (fragments) issus d'une réaction de fission et de prédire leur désexcitation par émission de neutrons, gamma et électrons.

Grâce à cet outil, le calcul d'un grand nombre « d'observables de fission » dont la physique des réacteurs a besoin devient ainsi possible. Cependant, il est nécessaire de valider les modèles implémentés dans le code. Une façon de faire est de réaliser des expériences dites multi observables que FIFRELIN cherchera à reproduire en affinant les modèles et/ou les paramètres de ces modèles. Ces expériences multi-observables consistent à mesurer en coïncidence les deux fragments de fission ainsi que les neutrons et gamma prompts émis par ces fragments, afin de mettre en évidence les corrélations entre ces observables. C'est précisément la vocation du dispositif VESPA++, récemment développé par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne situé à Geel en Belgique (JRC-Geel).

Deux phases de 18 mois environ sont prévues au cours de cette thèse. Une phase expérimentale durant laquelle l'étudiant(e) sera détaché(e) au JRC-Geel. L'étudiant(e) se familiarisera alors avec le fonctionnement du dispositif

VESPA++, participera aux expériences et analysera les données brutes récoltées. Une deuxième phase sera consacrée à l'amélioration des modèles implémentés dans FIFRELIN afin de reproduire les résultats expérimentaux. Lors de cette seconde phase, l'étudiant(e) sera basé(e) à Cadarache.

■ **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieur et/ou Master 2 en Physique nucléaire

■ **Ecole doctorale**
Ingénierie - Matériaux - Environnement - Energétique - Procédés - Production (IMEP2) - Université Grenoble Alpes

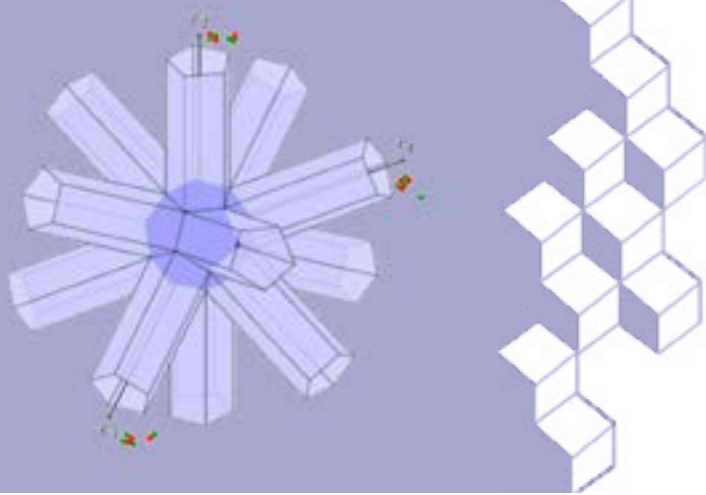
■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
SEROT Olivier
CEA

■ **Chercheur à contacter**
LITAIZE Olivier
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 72 57
olivier.litaize@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Modélisation des sections efficaces nucléaires ab-initio combinant théorie de la matrice R et fonctions de Green auto-cohérentes

DER/SPRC/LEPH

La physique nucléaire microscopique vise à modéliser les propriétés de structure et de réaction des noyaux atomiques en se plaçant à l'échelle des nucléons avec comme ingrédient de base l'interaction élémentaire entre nucléons.

Parmi les approches microscopiques, les méthodes ab-initio s'appuient sur des interactions dérivées de manière systématique via une théorie effective de la Chromo-Dynamique Quantique et ajustées dans les systèmes légers. La description quantique de N corps en interaction est transcrite dans une fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger à N corps. Plusieurs stratégies ont été élaborées pour approcher une solution exacte. Parmi elles, la théorie des fonctions de Green auto-cohérente reformule le problème à N corps en substituant la fonction d'onde inconnue par des fonctions de Green. Un aspect intéressant de cette théorie est qu'elle fait intervenir un champ – systématiquement améliorable – pouvant décrire l'interaction « ressentie » par un nucléon approchant le noyau. Ce champ – la « self-energy » – utilisé dans le calcul de la structure d'un noyau isolé est donc utilisable pour traiter les réactions nucléaires impliquant ce noyau.

le formalisme et prendre en main les outils associés, notamment le code HFB sphérique SPAN donnant les contributions à l'ordre 1 dans le formalisme des fonctions de Green. Les diagrammes d'interaction correspondant à l'ordre supérieur devront ensuite être implémentés. Enfin la self-energy obtenue sera utilisée pour représenter des réactions nucléaires, notamment en s'appuyant sur la théorie de la matrice-R qui permet de décrire l'état d'un nucléon dans le continuum, c'est-à-dire non-lié au noyau. Cette approche permet de traiter à la fois les contributions directe et d'échange de l'interaction du nucléon avec le noyau.

Dans un premier temps, l'étudiant devra assimiler



© CEA

Multiplicité de neutrons prompts de fission dans le domaine des résonances résolues du Plutonium 239

DER/SPRC/LEPH

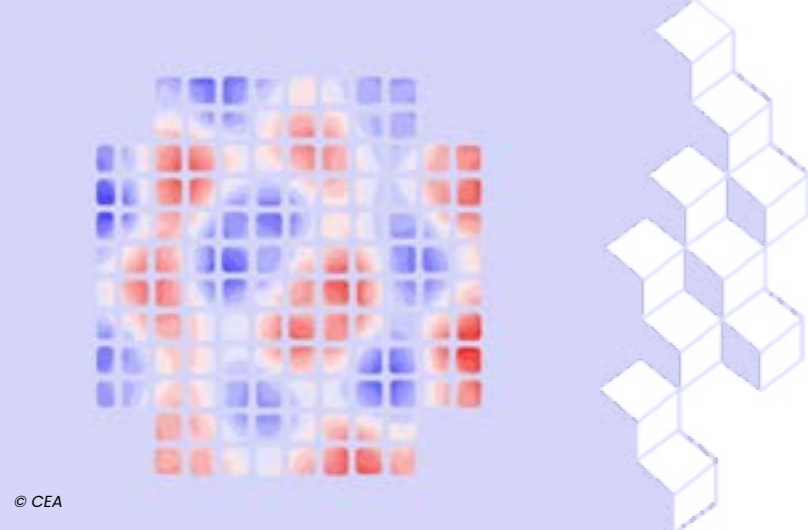
Multiplicité de neutrons prompts de fission dans le domaine des résonances résolues du ²³⁹Pu.

Cette thèse a pour but de mieux comprendre le rôle du processus $(n, \gamma f)$ sur le nombre de neutrons prompts émis par fission (multiplicité « nubar ») dans la région des résonances résolues du Pu-239 (de 0.3 à 100 eV). L'émission de rayons gamma avant la fission peut expliquer la valeur plus faible de nubar observée dans cette région en énergie. Dans une première étape, des expériences doivent être réalisées par temps de vol dans l'installation GELINA du JRC de Geel en Belgique. Une seconde étape de la thèse consistera à utiliser le code FIFRELIN développé au sein du laboratoire à Cadarache pour simuler les événements de fission. Pour les résonances qui présentent une forte composante $(n, \gamma f)$, le gamma émis avant la fission devrait modifier sensiblement le spectre de gammas prompts de fission émis par les fragments à cause de la diminution de l'énergie d'excitation du système. Ce phénomène d'émission d'un gamma avant la fission n'est pas encore pris en compte dans le code FIFRELIN, l'étudiant devra implémenter un modèle permettant de le faire. Une solution simple consisterait à modéliser le

processus en deux étapes : émission d'un gamma par le noyau composé (modèle déjà implémenté) puis fission du noyau résiduel (modèle également implémenté). A travers cette thèse, le doctorant développera des compétences en physique nucléaire théorique et expérimentale.

- **Formation recommandée**
M2 en physique nucléaire ou équivalent
- **Ecole doctorale**
PHENIICS (PHENIICS) – Paris-Saclay
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
SOMA Vittorio
CEA
- **Chercheur à contacter**
TAMAGNO Pierre
IRESNE – l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 33 64
pierre.tamagno@cea.fr

- **Formation recommandée**
Master 2 Physique nucléaire / Ecole d'ingénieurs
- **Ecole doctorale**
Ecole Doctorale de Physique de Grenoble (EdPHYS) – Université Grenoble Alpes
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
LITAIZE Olivier
CEA
- **Chercheur à contacter**
SEROT Olivier
IRESNE – l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 76 30
olivier.serot@cea.fr



© CEA

Simulation Monte Carlo de la fonction de transfert d'un réacteur nucléaire pour l'exploitation de mesures de bruit neutronique

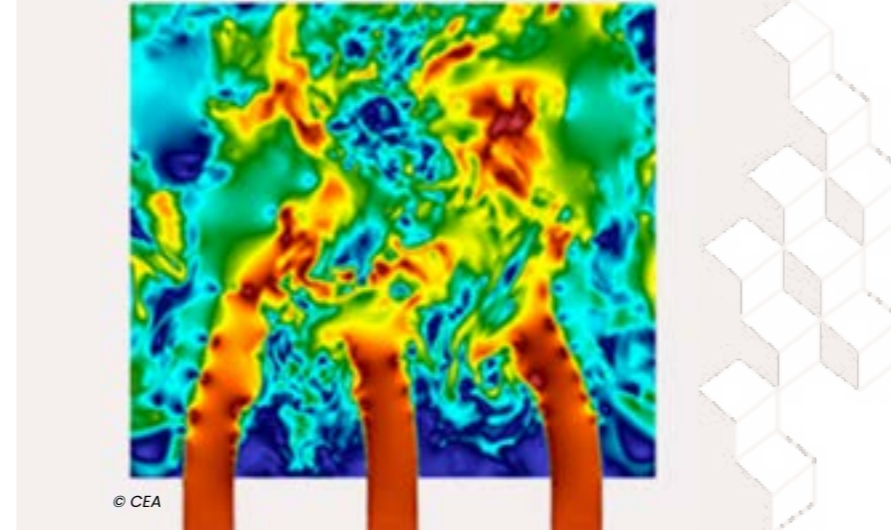
DER/SPRC/LPN

La population de neutrons dans un réacteur fluctue en raison du caractère aléatoire de l'émission des neutrons et des différentes sources de vibrations mécaniques qui peuvent impacter les sections efficaces neutroniques.

Le réacteur peut alors être vu comme un système associé à une fonction de transfert qui relie une excitation (la vibration ou le caractère aléatoire de l'émission des neutrons par fission) à la population de neutrons. L'étude et la mesure de cette fonction de transfert permettent de remonter à des paramètres neutroniques essentiels liés à la cinétique d'émission des neutrons retardés, ou bien même à la source de vibrations. Or, l'expression théorique de cette fonction de transfert est le plus souvent basée sur la cinétique du réacteur ponctuel qui dans certains cas ne permet pas d'exploiter avec fiabilité les mesures réalisées.

retardés. Dans un second temps, il s'agira d'utiliser des outils plus fidèles à la réalité couplant un transport des neutrons dans la matière « analogue » (c'est à dire au plus proche de la réalité) par méthode Monte Carlo (TRIPOLI-4) à un code simulant l'émission détaillée des neutrons (FIFRELIN) afin d'interpréter des mesures passées. Enfin, un dernier volet de la thèse sera dédié aux applications pratiques que pourraient avoir la mesure de ces fluctuations dans l'exploitation de petits réacteurs.

Dans ce travail de thèse, on propose d'étudier différentes extensions du formalisme de la fonction de transfert neutronique au moyen de simulations Monte Carlo. Dans un premier temps, on simule des fluctuations à l'aide d'un code simplifié en C++ afin de confirmer les hypothèses des équations théoriques du « bruit neutronique » qui peuvent être utilisées pour « mesurer » la fraction effective de neutrons



© CEA

Simulations multiphysiques avec estimation d'incertitudes appliquées aux réacteurs rapides refroidis au sodium

DER/SPRC/LEPH

La modélisation multiphysique est un outil puissant pour l'analyse des réacteurs nucléaires, mais la propagation des incertitudes entre les physiques est souvent négligée car complexe.

Cette thèse propose des approches innovantes pour améliorer la modélisation multiphysique en prenant en compte ces incertitudes. L'objectif principal est de proposer des approches de modélisation optimales adaptées à diverses exigences de précision.

Cette recherche répond à des attentes fortes de la part des chercheurs et des professionnels de l'industrie qui souhaitent utiliser des modèles multiphysiques.

La thèse évaluera d'abord diverses techniques de propagation d'incertitude applicables aux simulations multiphysiques. Cela implique d'explorer la modélisation par substitution à travers des avenues telles que la modélisation d'ordre réduit et l'expansion du chaos polynomial. L'intention est d'identifier et de classer les paramètres d'entrée ayant l'impact le plus significatif sur les sorties du système, indépendamment de leur domaine physique.

Ensuite, la propagation de l'incertitude sera effectuée en utilisant deux types de modélisation de base : un modèle « haute fidélité

» basé sur les outils de simulation de référence du CEA et un modèle de « meilleure estimation » qui intègre la finalité « industrielle » des calculs. Les similitudes et les différences entre ces approches seront analysées pour mettre en évidence la propagation des biais du modèle dans les cas considérés.

Ces évaluations de l'incertitude, en utilisant les méthodes décrites, seront testées sur un ensemble étendu d'expériences effectuées dans le réacteur SEFOR, un réacteur rapide refroidi au sodium qui offre une ressource précieuse pour valider les modèles multiphysiques.

■ **Formation recommandée**
Master Recherche ou Diplôme école d'ingénieur

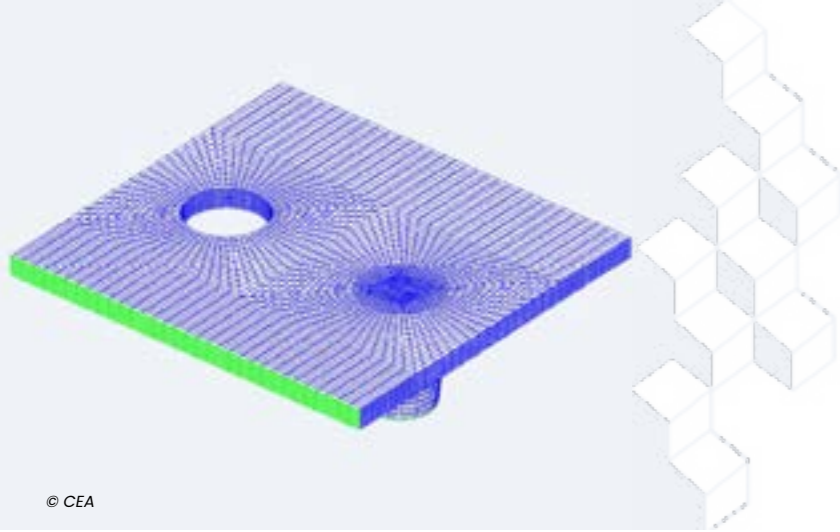
■ **Ecole doctorale**
Physique et Sciences de la Matière (ED352)
Aix-Marseille Université

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
BUIRON Laurent
CEA

■ **Chercheur à contacter**
GARCIA CERVANTES Elias
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 71 40
Elias-Yammir.GARCIA-CERVANTES@cea.fr



© CEA

Le Laboratoire d'études et de modélisation de systèmes du CEA/IRENE à Cadarache étudie des dispositifs passifs de minimisation du débit d'eau sortant de la cuve d'un réacteur à eau pressurisée et de gestion des réserves d'eau disponibles pour les injections de sûreté, en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire.

Ces dispositifs, tels les limiteurs de débit en cuve ou les accumulateurs avancés, fonctionnent sur le principe des diodes hydrauliques, afin d'empêcher ou de retarder le dénoyage du cœur et sa possible dégradation.

Cette thèse porte sur la modélisation numérique par la méthode de Frontière Immergée (Penalized Direct Forcing, PDF) d'écoulements thermohydrauliques en régime turbulent sous diverses discrétisations spatiales. La technique d'introduction d'un terme de forçage direct dans les équations de Navier-Stokes permet de prendre en compte des obstacles dans un écoulement incompressible. Elle associe méthodes de projection et de pénalisation des vitesses. Elle conduit à un traitement naturel des conditions aux limites pour la correction de pression aux bords des obstacles. Le doctorant s'appuiera sur les acquis de deux thèses récentes dédiées à la simulation d'écoulements laminaires ou turbulents par la méthode PDF en discrétisation spatiale Éléments Finis dans un modèle scalaire de la turbulence. Il étendra ces travaux aux autres

discrétisations spatiales (Volumes Éléments Finis, Volumes Différences Finies) et aux équations d'évolution de la turbulence. Il réalisera la vérification-validation de la méthodologie de calcul sur des cas-tests académiques et il appliquera la méthode à la simulation des diodes hydrauliques.

Le doctorant développera des compétences en simulation thermohydraulique et méthodes numériques

Simulations thermohydrauliques d'écoulements turbulents par la méthode de la frontière immergée pour des dispositifs de sûreté innovants de réacteurs nucléaires

DER/SESI/LEMS

■ **Formation recommandée**
Master 2 ou école d'ingénieurs

■ **Ecole doctorale**
Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPMM) - Aix-Marseille Université

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/11/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
BELLIARD Michel
CEA

■ **Chercheur à contacter**
BELLIARD Michel
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 23 17
michel.belliard@cea.fr

Département de Technologie Nucléaire

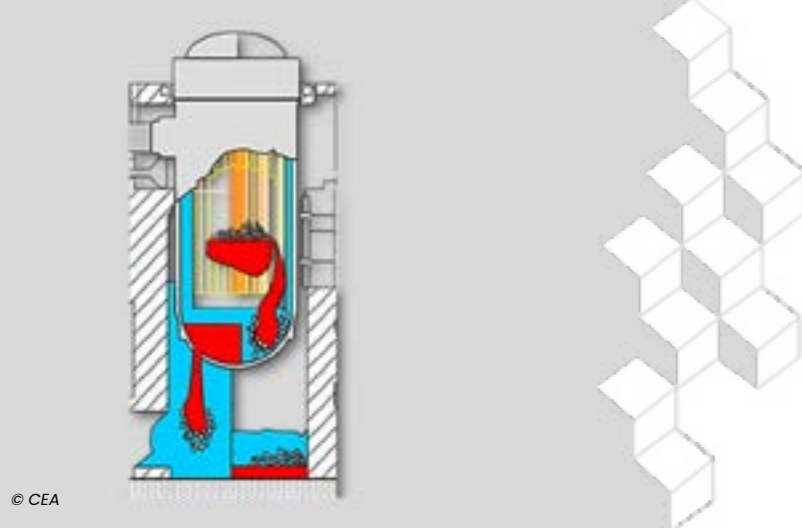
Le Département de Technologie Nucléaire (DTN) est une unité de R&D dont les missions sont d'améliorer la technologie des réacteurs nucléaires actuels et de développer celle des réacteurs futurs en :

- étudiant, concevant et réalisant des essais de qualification de composants de réacteurs (assemblages, dispositifs...),
- étudiant le comportement et les performances des caloporteurs,
- développant l'instrumentation pour la surveillance réacteur, le contrôle de procédé, la mesure nucléaire,
- modélisant le transfert des radionucléides dans l'environnement et en réacteurs,
- étudiant les accidents graves.

Le DTN qui compte environ 250 salariés (dont 200 CDI, 30 doctorants, et postdoc, CDDO, DouATA, apprentis, stagiaires) est organisé en deux services :

- Le Service de Modélisation des Transferts et des Accidents graves (SMTA),
- Le Service de Technologie des Composants et des Procédés (STCP).

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Assimilation de données transitoires et calibration de codes de simulation à partir de séries temporelles

DTN/SMTA/LMAG

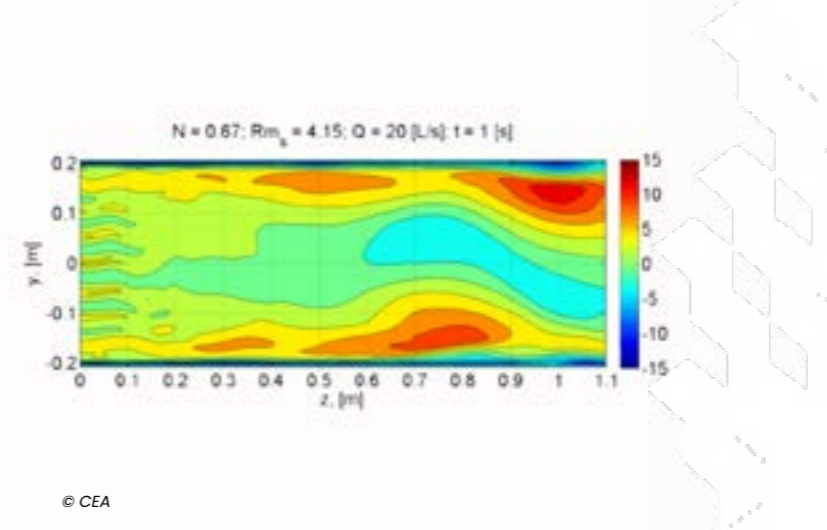
Dans le cadre de la simulation scientifique, certains outils (codes) de calcul sont construits comme un assemblage de modèles (physiques) couplés dans un cadre numérique.

Ces modèles et la façon dont ils sont couplés utilisent des jeux de paramètres ajustés sur des résultats expérimentaux ou sur des résultats de calculs fins de type « Simulation numérique directe » (DNS) dans une démarche de remontée d'échelle. Les observables de ces codes, ainsi que les résultats expérimentaux ou les résultats des calculs fins, sont majoritairement des grandeurs temporelles. L'objectif de cette thèse est alors de mettre en place une méthodologie de fiabilisation de ces outils en ajustant leurs paramètres par assimilation de données à partir de ces séries temporelles.

Un travail sur l'ajustement de paramètres a déjà été réalisé dans notre laboratoire dans le cadre d'une thèse précédente, mais en utilisant des scalaires dérivés des résultats temporels des codes. La méthodologie développée durant cette thèse a intégré des étapes de criblage, de métamodélisation, et d'analyse de sensibilité qui pourront être repris et adaptés au nouveau format des données. Une étape préalable de transformation des séries temporelles sera à mettre au point, afin de réduire les données tout en limitant les pertes d'information. Des outils de machine learning / deep learning pourront être envisagés. L'application de cette méthode se fera dans le cadre de la

simulation des accidents graves de réacteurs nucléaires. Durant ces accidents le cœur se dégrade et du corium (magma de combustible et d'éléments de structure issus de la fusion du cœur du réacteur) se forme et peut se relocaliser et interagir avec son environnement (liquide réfrigérant, acier de la cuve, béton du radier, ...). Certains codes de simulation d'accidents graves décrivent individuellement chaque étape / interaction, quand d'autres décrivent la totalité de la séquence accidentelle. Ils ont en commun d'être multiphysiques et d'avoir un nombre de modèles et de paramètres souvent grand. Ils décrivent des phénomènes physiques transitoires dans lesquels le caractère temporel est important.

La thèse se déroulera au Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves de l'institut IRESNE au CEA Cadarache, dans une équipe au meilleur niveau national et mondial pour l'étude numérique des phénomènes liés au corium, de sa génération à sa propagation et son interaction avec l'environnement. Les techniques mises en œuvre pour l'assimilation de données ont également un important potentiel générique qui assurent des débouchés importants pour le travail proposé, dans le monde du nucléaire et ailleurs.



© CEA

Calculs et expériences portant sur des écoulements MHD de métal liquide application aux pompes électromagnétiques pour la filière sodium

DTN/STCP/LCIT

Les pompes électromagnétiques (PEM) mettent en mouvement sans contact un métal liquide conducteur de l'électricité. Elles présentent ainsi une excellente étanchéité pour les caloporteurs dans les réacteurs à neutrons rapides ou à fusion, tout en minimisant l'inventaire en déchets.

Dans les PEM à induction, la force de Lorentz de pompage est issue de l'interaction entre le champ magnétique d'excitation et le courant qu'il induit dans le liquide conducteur, lequel se déplace à une vitesse relative. Ce couplage est typique de la magnétohydrodynamique (MHD).

Lorsque l'écoulement MHD devient turbulent, un verrou scientifique émerge lié à la description des couches limites turbulentes. La simulation numérique directe (DNS) permet de lever des hypothèses en se passant de modèles sous-maille pour décrire les couches limites. Le prix à payer est le temps de calcul rédhibitoire pour l'ingénieur qui veut concevoir une PEM en géométrie réelle. Le but de cette thèse est de calculer par DNS, en géométrie simplifiée, mais suffisamment représentative d'une PEM, les quantités MHD (vitesse, courant et potentiel électriques). Des calculs pourront être menés en parallèle en utilisant des modèles avec lois de fermeture, plus accessibles à l'ingénieur. L'objectif est d'établir, s'il en existe, des

domaines de validité de ces lois de fermeture.

Un écoulement MHD en canal sera modélisé, laminaire ou faiblement turbulent. Le champ magnétique pourra être imposé uniforme, non-uniforme, puis glissant et/ou oscillatoire. Les simulations numériques seront validées sur un dispositif expérimental à finaliser, permettant un écoulement de galinstan (métal liquide à température ambiante) et de la vélocimétrie à ultrasons ou potentiels électriques.

Cette thèse doit permettre de mieux comprendre les écoulements MHD turbulents en canal afin d'alimenter le travail futur de modélisation des pompes électromagnétiques pour des nombres de Reynolds et Hartmann représentatifs. Ce travail ouvre des perspectives professionnelles en particulier dans les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie. Cette thèse se déroulera au SIMaP de Grenoble avec quelques séjours à Cadarache (13).

■ **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieur (ou master recherche) généraliste ou en mécanique des fluides

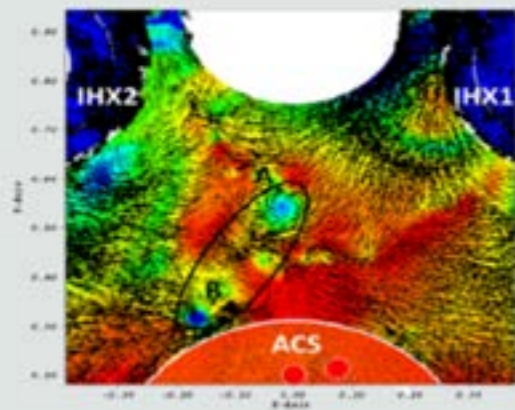
■ **Ecole doctorale**
Ingénierie - Matériaux - Environnement - Energétique - Procédés - Production (IMEP2) - Université Grenoble Alpes

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
DAVOUST Laurent
UGA

■ **Chercheur à contacter**
PAUMEL Kevin
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 20 46
kevin.paumel@cea.fr



© H. Bhatia, U. Bieder, D. Guenadou

Caractérisation des vortex à la surface d'une maquette représentative d'un réacteur de 4e génération

DTN/STCP/LTHC

Les réacteurs de 4^{ème} génération à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) constituent une solution pérenne à la crise énergétique et au réchauffement climatique.

Dans le cadre du programme ASTRID, le CEA a été engagé durant environ 10 ans dans la conception d'un démonstrateur industriel. Malgré l'arrêt du projet en 2019, les recherches sur la technologie des RNR-Na se poursuivent au travers d'études de concepts innovants de réacteur (Anais, Atrium...).

Dans la conception de ce type de réacteur, la cuve comporte une surface libre couverte d'argon pour réduire les transferts thermiques vers le couvercle. Sous certaines conditions, ce gaz peut être entraîné au travers de vortex dans la partie basse du réacteur en raison de l'aspiration des pompes. Le relâchement d'une poche de gaz ainsi formée au niveau des assemblages de combustible est une source d'augmentation de la réactivité neutronique et soulève des questions de sûreté. Il est donc essentiel de pouvoir caractériser les conditions opératoires pour lesquelles ces vortex peuvent apparaître à la surface. Cette problématique étant très difficile à appréhender par les codes de calculs, des expérimentations ont donc été menées pour étudier l'occurrence de l'entraînement de gaz dans diverses configurations. Néanmoins les outils mis en œuvre lors de ces campagnes d'essais ne permettent pas à ce stade une analyse suffisamment approfondie pour comprendre la phénoménologie de formation des vortex.

La thèse proposée a ainsi pour vocation d'étudier les vortex à la surface de la maquette MICAS, représentative à l'échelle 1/6 du projet de réacteur ASTRID. Le sodium étant complexe à utiliser pour les expérimentations, un fluide simulant, l'eau, est mis en œuvre dans ces essais.

L'objectif de cette recherche est de caractériser finement les vortex en termes d'occurrence, de diamètre, de profondeur et de vitesse afin d'apporter des éléments nécessaires à leur modélisation et leur prédiction dans les codes de calculs. Le travail de thèse se décomposera, hormis la partie bibliographique, en 3 parties, correspondant sommairement aux trois années de la thèse : développement du système de caractérisation basé sur de l'imagerie, caractérisation des vortex suivant différentes configurations (géométriques et opératoires), intégration dans un modèle. Une première solution envisagée pour le système de caractérisation des vortex est basée sur un réseau de caméras à grand champ, placées sous différents angles, mais d'autres solutions pourront aussi être étudiées.

Le laboratoire d'accueil dispose déjà de la maquette et des moyens de mesure (caméras rapides, système de mesure de vitesse...) afin de mener des expérimentations dès l'arrivée du doctorant. Ils pourront être complétés par d'autres outils en fonction du système de caractérisation développé. Enfin une ouverture vers l'international pourra être envisagée au travers de la collaboration avec l'agence japonaise JAEA.

Le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

■ **Formation recommandée**
Mécanique de fluides et optique

■ **Ecole doctorale**
Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés, et de l'Energie (SIMPPE) – Université de Lorraine

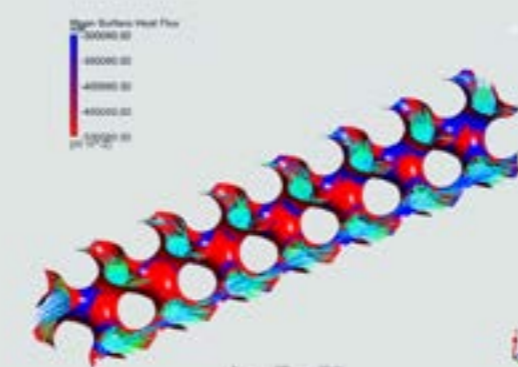
■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/07/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
LABERGUE Alexandre
Université de Lorraine CNRS
LEMTA

■ **Chercheur à contacter**
GUENADOU David
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 47 64
david.guenadou@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Contribution expérimentale et numérique à la caractérisation des transferts de chaleur dans un échangeur TPMS – application aux échangeurs intermédiaires d'un réacteur à sel fondu

DTN/STCP/LCIT

Le travail proposé est dédié aux verrous technologiques associés à la famille des réacteurs nucléaires très innovants dits à sels fondus (ou Molten Salt Reactor, MSR).

Dans un MSR à boucles, le sel combustible transporte avec lui des précurseurs de neutrons retardés, qui génèrent des fissions hors du cœur. Dans ces conditions, pour faciliter le pilotage du réacteur, le volume de sel combustible hors cœur doit être minimisé. Cette contrainte impose une puissance volumique échangée supérieure à la puissance volumique du cœur au niveau des échangeurs intermédiaires, qui extraient la puissance du cœur.

Le projet ISAC développe un MSR à neutrons rapides, dont le cœur présente une puissance volumique de 250 MW/m³. Cette puissance volumique, associée aux spécificités du sel combustible, représente un objectif ambitieux pour les technologies d'échangeurs dites classiques. L'une des solutions proposée pour maximiser la puissance volumique de l'échangeur intermédiaire consiste à adopter de nouveaux motifs d'échange. Les géométries TPMS (Triply Periodic Minimal Surface), assemblées pour constituer des canaux d'échange 3D, constituent des candidats intéressants. La construction de tels échangeurs est permise par les procédés de fabrication additive.

La bibliographie a mis en évidence une certaine émulation sur ce type d'échangeurs, mais peu d'études portent sur des échanges thermiques liquide/liquide en régime turbulent. Au Laboratoire de Conception et d'Innovation Technologique (LCIT), des géométries adaptées

aux spécificités des MSR, ont été sélectionnées par calculs CFD. Sur la base de ces résultats, des maquettes d'échangeurs TPMS en acier inoxydable sont en cours de fabrication.

Le sujet de thèse propose aujourd'hui une validation expérimentale des corrélations d'échange thermique et de coefficient de frottement propres aux géométries TPMS. Le calcul CFD permettra de développer le programme expérimental. L'élaboration d'essais en fluide simulant s'appuiera sur une équivalence en nombre de Reynolds et nombre de Prandtl. Les verrous principaux du travail de recherche proposé tiennent à la nature 3D des canaux et la compréhension de l'influence de la rugosité dans des canaux obtenus par fabrication additive. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus permettront de développer les modèles CFD.

La compacité des échangeurs de chaleur est un enjeu récurrent dans le développement de tout système de conversion d'énergie. Les corrélations validées au cours de ce Doctorat permettront de dimensionner d'autres échangeurs TPMS pour diverses applications. De plus, le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche, les départements de R&D dans l'industrie et les unités de conception de systèmes innovants.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

■ **Formation recommandée**
Diplôme d'ingénieur ou master avec spécialisation en thermique, énergétique, mécanique des fluides

■ **Ecole doctorale**
Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME) ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace)

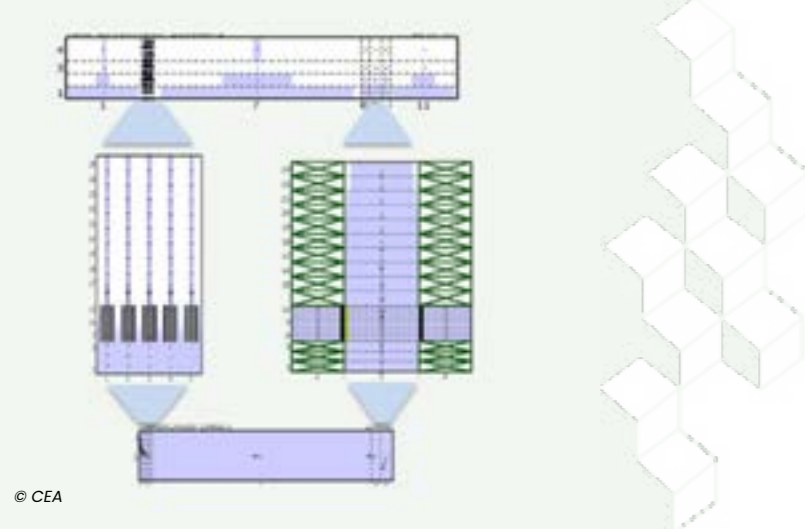
■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/09/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
FENOT Matthieu
CNRS-ISAE ENSMA-Université de Poitiers

■ **Chercheur à contacter**
JEANNINGROS Xavier
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 77 93
xavier.jeanningros@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Décomposition de domaine multi-bloc et non conforme, adaptée au couplage aux frontières 'exact' du code de thermohydraulique SIMMER-V

DTN/SMTA/LMAG

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la recherche nécessaire pour l'utilisation durable de l'énergie nucléaire dans un mix énergétique décarboné respectueux du climat.

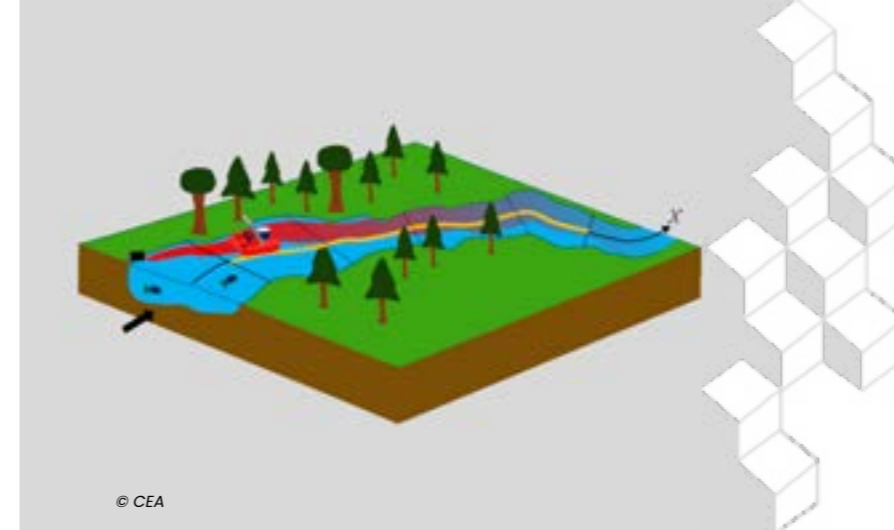
Les réacteurs de 4^e génération refroidis au sodium sont alors des candidats de grand intérêt pour l'économie de la ressource en uranium et la minimisation du volume des déchets ultimes.

Dans le cadre de la sûreté de tels réacteurs, il est important de pouvoir décrire avec précision les conséquences d'une éventuelle dégradation du cœur. Une collaboration avec son homologue japonais JAEA permet au CEA de développer le code SIMMER-V dédié à la simulation de la dégradation du cœur. Le code calcule la thermohydraulique du sodium, la dégradation des structures et la neutronique du cœur pendant la phase accidentelle. L'objectif est de pouvoir représenter non seulement le cœur mais aussi son environnement direct (circuit primaire) avec précision. La prise en compte de cette topologie requiert de partitionner le domaine et d'utiliser une méthode de couplage aux frontières. La limite de cette approche réside généralement dans la qualité et la robustesse de la méthode de couplage, en particulier lors de transitoires rapides au cours desquels des ondes de pression et de densité sont amenées à traverser les frontières.

Une méthode de couplage a été initiée au Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves de l'institut IRESNE de Cadarache (Annals of Nuclear Energy 2022, Implementation of multi-domains in SIMMER-V thermohydraulic code), qui consiste à fusionner les différentes décompositions de chacun des domaines, dans le but de

constituer une décomposition unique du calcul global. Cette méthode a été développée dans un cadre simplifié où les maillages (cartésiens) se raccordent de manière conforme au niveau des frontières. L'opportunité qui s'ouvre est d'étendre cette méthode au cas des raccords quelconques en utilisant la librairie MEDCoupling. Cette première étape dont la faisabilité a été acquise permettra d'assembler des composants pour constituer un système de type 'loop' (réacteur à boucles). La deuxième étape consistera à étendre la méthode de sorte qu'un domaine de calcul puisse être totalement emboîté dans un autre. Cet emboîtement permettra alors de constituer un domaine par juxtaposition ou par emboîtement avec des maillages et des décompositions de domaine non conformes. Après avoir vérifié les qualités numériques de la méthode, la dernière étape applicative consistera à construire une simulation de la dégradation d'un cœur plongé dans sa cuve primaire (configuration 'pool') permettant de valider la méthode suivie.

Ce travail permettra à l'étudiant de développer des connaissances en techniques numériques et modélisation pour les systèmes physiques complexes avec écoulements. Il mettra en œuvre des techniques allant de la conception à la validation de méthodes, dans une équipe pluridisciplinaire et dynamique au CEA Cadarache.



© CEA

Dispersion transverse de polluants dans une rivière de piedmont présentant une alternance de radiers-mouilles : application à la moyenne Durance

DTN/SMTA/LMTE

Lors du rejet de polluant dans une rivière, il est important de connaître la distance aval à partir de laquelle ce polluant va être distribué de façon homogène dans toute la section transverse, afin d'être en mesure de délimiter la zone de mélange.

Pour l'estimer, la méthode usuelle consiste à appliquer un modèle d'advection-diffusion basé sur l'estimation d'un coefficient de mélange transverse. Si de nombreuses formules existent pour l'estimer, la plupart ne sont validées que dans certaines configurations de cours d'eau.

Dans un travail précédent, Lorris Gond [2022] a découpé un linéaire de la Durance en tronçons successifs en fonction des faciès hydromorphologiques rencontrés et a déterminé le coefficient de mélange transverse dans chaque tronçon à partir d'un traçage au colorant. Ces résultats confirment l'hypothèse de processus de mélange transverse spécifique aux structures de radiers-mouilles rencontrées en moyenne Durance.

La thèse proposée a pour objectif de vérifier cette hypothèse dans les rivières présentant des structures de type radiers-mouilles. Il s'agit ensuite de déterminer une méthodologie de calcul d'un coefficient de mélange global de la structure à partir de la connaissance a priori des faciès, afin de

s'affranchir de nouvelles mesures in situ à chaque modification morphogène du lit. La thèse comportera pour cela une caractérisation sur le terrain de la géométrie d'une portion de la moyenne Durance, la réalisation de traçages au colorant pour quantifier le coefficient de mélange transverse en rivière et la reproduction expérimentale en canal de laboratoire d'une structure radier-mouille.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

■ **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieur mécanique des fluides

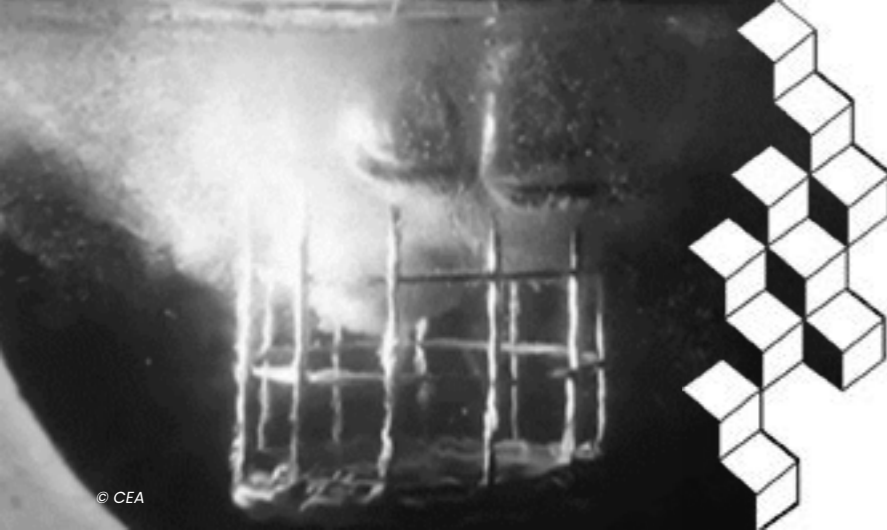
■ **Ecole doctorale**
Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique (MEGA) - INSA Lyon

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
BERNI Céline
INRAE - RIVERLY

■ **Chercheur à contacter**
KATEB Lylià
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 33 94
lylia.kateb@cea.fr



Étude d'un procédé de lavage innovant pour le traitement de composants sodés issus d'installations utilisant du sodium liquide comme caloporteur

DTN/STCP/LTPS

Le sodium est utilisé comme fluide caloporteur dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides. Compte tenu des températures de fonctionnement de ces installations, toutes les surfaces en contact avec le sodium liquide restent mouillées par du sodium résiduel une fois les circuits vidangés et égouttés.

Le traitement de ce sodium résiduel est impératif pour assurer la sécurité des interventions sur les composants et structures dans un processus de démantèlement. Le procédé de référence pour cette action est le lavage à l'eau dans un puits de lavage dédié. Ce procédé met en œuvre une réaction du sodium avec l'eau sous différentes formes, en maîtrisant la cinétique de réaction, qui est instantanée et fortement exothermique sans contrôle de la mise en contact des réactifs.

Une étude exploratoire menée au CEA a fait l'objet d'une thèse soutenue en 2014 sur l'utilisation de sels pour mitiger la cinétique de réaction. Le laboratoire d'Études des technologies Sodium et Caloporteurs avancés (DES/IRENE/DTN/STCP/LESC) possède ainsi des installations de R&D, instrumentées et dédiées à l'étude des procédés de lavage du sodium et équipées des fonctionnalités d'un puits de lavage industriel, telles que des rampes d'aspersion, des buses d'atomisation et un dispositif d'immersion.

Le principal objectif scientifique de la nouvelle thèse proposée est à présent d'identifier, de comprendre et de modéliser les mécanismes physico-chimiques impliqués dans la cinétique réactionnelle sodium-eau en présence de sels. Ces travaux permettront de limiter ou d'éviter les phénomènes d'onde de pression ou d'explosion lors du traitement du sodium résiduel des circuits de réacteurs

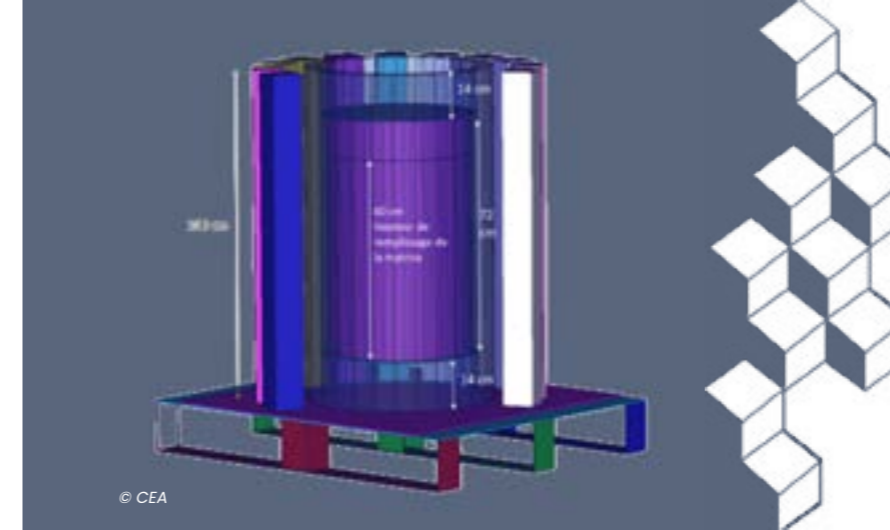
nucléaires à neutrons rapides lors de leur assainissement-démantèlement. Le doctorant aura pour mission de définir les plans d'expérience, de participer activement à la réalisation des campagnes d'essai, d'exploiter les résultats et de proposer une interprétation des phénomènes observés (cinétiques, pic de pression, élévation locale de température...). Les essais auront pour objectif d'acquérir des données de thermodynamique et de cinétique de réaction fiables, tels que les temps de réaction, la variation de la pression dynamique, l'élévation de la température, la composition des phases gaz et liquide, la spéciation en phase liquide et la visualisation de la phénoménologie via caméra rapide. Des outils de modélisation seront mis à sa disposition pour établir et simuler un modèle de cinétique réactionnelle. À terme, les travaux proposés permettront de qualifier le procédé pour une application industrielle dans le domaine de l'assainissement/démantèlement à fort enjeu pour la filière nucléaire française.

En complément de l'expérience acquise dans le domaine du démantèlement de systèmes nucléaires, le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

- **Formation recommandée**
Bac+5, école d'ingénieur Génie chimique - génie des procédés
- **Ecole doctorale**
Mécanique, Energétique, Génie Civil, Procédés (MEGEP) - Autre
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
ESPITALIER Fabienne
IMT Mines Albi-Carmaux - RAPSODEE
- **Chercheur à contacter**
GICQUEL Leïla
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 46 96
leila.gicquel@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Etude des scintillateurs plastiques pour les mesures neutroniques passive et active

DTN/STCP/LTPS

Le travail doctoral proposé est dédié à l'optimisation des méthodes de caractérisation non-destructives de la quantité de plutonium dans les colis de déchets radioactifs.

L'une des principales méthodes de mesure nucléaire pour atteindre cet objectif est basée sur le comptage passif des coïncidences entre neutrons de fission spontanée. La plupart des postes de mesure neutronique sont équipés de compteurs ^3He qui présentent l'avantage d'avoir un bon rendement de détection tout en étant peu influencés par le rayonnement gamma.

Cependant, le prix de ces détecteurs a beaucoup augmenté ces dernières années et ils sont relativement lents car ils nécessitent une thermalisation préalable des neutrons à détecter. Les scintillateurs plastiques représentent une alternative 5 à 10 fois moins coûteuse à efficacité de détection équivalente, ce qui les rend intéressants pour la mise en œuvre sur des postes industriels. En contrepartie, ils sont très sensibles aux rayonnements gamma et au phénomène de diaphonie (coïncidences parasites dues aux diffusions entre détecteurs voisins). Une méthode innovante de discrimination des coïncidences utiles et parasites par différentiation des temps de vols entre neutrons et rayonnements gamma a été élaborée et validée lors de travaux précédents.

Il reste des verrous pratiques importants ciblés par la présente thèse afin de tendre vers un poste de mesure neutronique industriel muni de ces scintillateurs, notamment pour les déchets technologiques (ORANO La Hague, MELOX Cadarache). L'objectif principal en mesure neutronique passive sera de franchir une étape dans l'efficacité de détection, le traitement de données et la réduction des incertitudes liées aux effets de matrice et de localisation de la matière nucléaire, en associant étroitement expériences et modélisation. Un objectif secondaire de la thèse sera de démontrer la faisabilité de la mesure neutronique active en terme de traitements de données et de tenue aux forts taux de comptage pour la quantification de la masse de matière nucléaire (détections des neutrons de fissions induites par générateur de neutrons).

Le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

- **Formation recommandée**
Ecole d'ingénieurs ou Master 2
- **Ecole doctorale**
Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur - Bordeaux
- **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024
- **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache
- **Directeur de thèse**
MICHELET Claire
LP2I Université de Bordeaux
- **Chercheur à contacter**
BOTTAU Vincent
IRENE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone
04 42 25 23 26
vincent.bottau@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Investigation expérimentale, modélisation et impact de propriétés thermophysiques du corium en situation d'accident grave d'un réacteur nucléaire

DTN/SMTA/LEAG

Dans un réacteur nucléaire, certains scénarios peuvent amener à des conditions extrêmes dites d'accidents graves avec fusion thermique du cœur.

Dans ce cas, un mélange multiphasique, appelé «corium» à base de combustible nucléaire et de métaux fondus, va se former à haute température (>2000°C), tel que dans les réacteurs de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima-Daiichi en 2011. La connaissance des propriétés thermophysiques du corium reste à ce jour limitée à cause du domaine des très hautes températures, du caractère multiphasique (solides, liquides, gaz) et de la multiplicité des compositions de corium. La connaissance de ces propriétés reste un enjeu fondamental pour les évaluations pour la sûreté nucléaire des réacteurs. La connaissance actuelle limitée conduit à un manque de robustesse de ces évaluations.

Pour répondre à ces enjeux scientifiques fondamentaux, le CEA développe depuis plusieurs années trois axes de recherche :

- un premier volet expérimental de mesure des propriétés thermophysiques -notamment masse volumique, tension de surface, et viscosité- des corium
- un deuxième volet de modélisation paramétrique des propriétés thermophysiques mesurées,
- un troisième volet de modélisation aux petites échelles par dynamique moléculaire.

Une première thèse a permis de développer un dispositif expérimental original sur l'installation VITI de la plateforme accidents graves PLINIUS de l'institut IRESNE, opérée par le laboratoire LEAG à Cadarache, capable de mesurer la tension de surface de corium jusqu'à des températures de l'ordre de 2700°C en utilisant la technique de MBP (Maximum Bubble Pressure). Dans une approche complémentaire, une thèse a permis de développer l'installation ATTILHA de l'institut ISAS opérée par le laboratoire LM2T à Saclay, permettant d'accéder à

des mesures précises de masse volumique à haute température (> 2000°C). Finalement, une thèse en cours au laboratoire LMAG de l'institut IRESNE à Cadarache portant sur la modélisation de la tension interfaciale du corium par approche Calphad et formalisme de Butler a mené à l'obtention de premiers résultats sur certaines compositions représentatives de corium en cuve.

Dans la continuité des travaux proposés ci-dessus, les laboratoires LEAG, LMAG et LM2T proposent conjointement une thèse qui ambitionne d'élargir la base de données expérimentale en s'appuyant sur la démarche suivante :

- Le premier volet inclut l'extension des essais de caractérisation à une grille (composition, température) élargie pour différents coriums d'intérêts. Le doctorant devra réaliser ces mesures de propriétés d'échantillons uranifères grâce à l'instrumentation de pointe implémentée sur les expériences VITI et ATTILHA. Il s'agira également d'aider à l'interprétation des essais par l'amélioration des outils de méthode inverse existants.

- Le second volet porte sur la modélisation de ces propriétés thermophysiques, afin d'explorer de manière plus complète la (vaste) grille (composition, température), qui restera pour partie inaccessible à la mesure, du fait de la difficulté de celle-ci en conditions extrêmes. Le travail du doctorant portera sur l'amélioration des outils ad hoc existants, basés notamment sur l'approche Calphad.

- Le dernier volet intègre les considérations à l'échelle système, où le doctorant appliquera des calculs réacteurs à des scénarios accidents graves, via l'outil PROCOR permettant d'évaluer la sensibilité du déroulement de l'accident aux nouvelles corrélations obtenues pour les propriétés thermophysiques d'intérêt.

■ Formation recommandée

Majeure en sciences et ingénierie des matériaux et procédés, mineure en instrumentation

■ Ecole doctorale

Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME) - Limoges

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

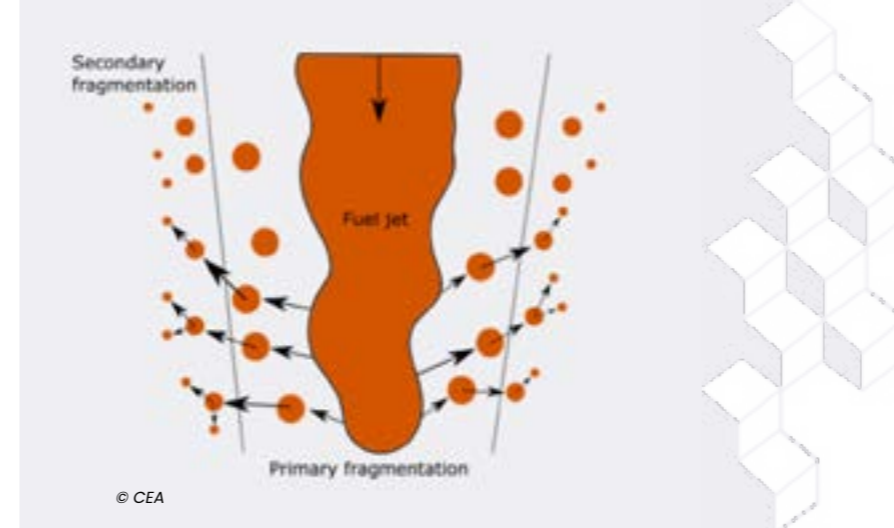
■ Directeur de thèse

PILUSO Pascal
CEA

■ Chercheur à contacter

DELACROIX Jules
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 35 64
jules.delacroix@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des études de sûreté associées aux Accidents Graves dans les Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au Sodium et plus particulièrement lorsque le cœur fondu se relocalise par gravité vers le récupérateur en fond de cuve.

Un jet de corium (mélange de combustible et éléments structuraux du cœur fondus) interagit alors violemment avec le fluide caloporteur du réacteur. Ce phénomène est appelé FCI pour Fuel Coolant Interaction. L'interaction induit entre autres la fragmentation du jet de corium (particules dispersées) couplée à l'ébullition en film du réfrigérant. Les caractéristiques du film de vapeur sont déterminantes pour étudier et modéliser la phase de fragmentation du combustible menant potentiellement à une explosion vapeur sodium.

La DNS (Direct Numerical Simulation) de l'ébullition en film dans ces conditions est très coûteuse notamment, en raison de la finesse des films, des transferts de masse à prendre en compte aux échelles les plus fines et de la prise en compte de la compressibilité.

L'objectif de la thèse est alors de simuler l'ébullition en film avec une modélisation compressible hors-équilibre à même de relaxer ces contraintes avec une grande généralité. En effet, la connaissance des déséquilibres entre les phases permet d'évaluer localement les échanges, par exemple de chaleur grâce à des corrélations semi-empiriques, tout en conservant une résolution propre des échelles d'écoulements principales. Le modèle proposé devra prendre en compte l'évaluation de l'aire interfaciale afin d'évaluer finement les transferts de masse et de chaleur à l'interface liquide-vapeur.

A partir de là, le travail de thèse sera

décomposé en 3 parties, en plus de l'étude bibliographique initiale. La première partie concernera le choix ou la proposition de modèles, macroscopiques enveloppes d'une part, à haute précisions d'autre part, permettant la simulation de l'ébullition en film. La deuxième partie verra ensuite la mise en œuvre dans le code CFD (Computational Fluid Dynamics) SCONE sur base TRUST (code Open Source développé au CEA) des modèles et méthodes numériques permettant la résolution fiable des problèmes considérés. Enfin la dernière partie du travail sera dédiée à des travaux prospectifs et à des études de sensibilité des modèles numériques, notamment géométrique et aux conditions thermiques (sous refroidissement du réfrigérant, champ de température dans le solide), afin de déterminer le domaine de validité des travaux proposés et les voies d'amélioration potentielles.

D'une manière générale, la thèse permettra de caractériser numériquement l'ébullition en film vapeur. L'amélioration de la modélisation de l'ébullition en film dépasse aussi largement le contexte des phénomènes d'interaction combustible réfrigérant et sera donc applicable à une multitude de problématiques industrielles et académiques. Le travail proposé ouvre ainsi des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

Modélisation et simulation d'ébullition sous haut flux en sodium

DTN/SMTA/LMAG

■ Formation recommandée

Ingénieur ou Master en physique, mécanique des fluides ou mathématiques appliquées. Des connaissances d'un bon niveau en transferts thermiques sont nécessaires. Un niveau avancé en développement C++ serait un atout

■ Ecole doctorale

Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique (SIMPON) - Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/09/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

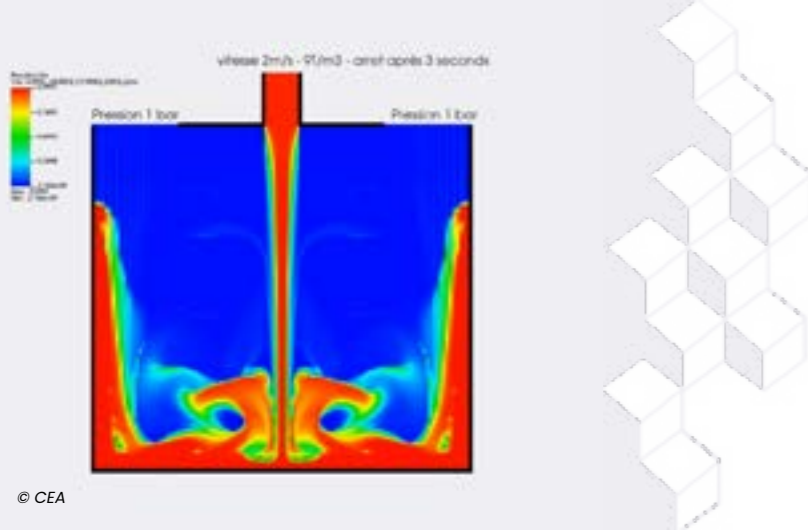
■ Directeur de thèse

MEDALE Marc
Aix-Marseille Université

■ Chercheur à contacter

PONS Kévin
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
kevin.pons@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Modélisation et simulation numérique des écoulements hydrodynamiques compressibles multimatériaux et multiphases pour la simulation de l'interaction Corium-Sodium

DTN/SMTA/LMAG

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la relance du nucléaire, et particulièrement des études de sûreté associées aux Accidents Graves (AG) dans les réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na).

Lors d'un tel hypothétique événement, un jet de corium (mélange de combustible et éléments structurels du cœur fondus) interagit avec le fluide caloporteur du réacteur. Ce phénomène, appelé FCI (Fuel Coolant Interaction), génère un transfert d'énergie vers le caloporteur qui peut mener à des explosions de vapeur. L'objectif de la thèse est d'améliorer les outils de simulation de la FCI pour les RNR-Na.

Le développement du code SCONE de calcul FCI s'appuie sur TRUST, plateforme numérique open source du CEA. TRUST est un outil mature d'un point de vue HPC et robustesse numérique, mais souffre de certaines de limitations numériques pour la simulation des AG : termes de transports à l'ordre 1, schémas peu adaptés à la simulation d'écoulements fortement compressibles et donc de l'explosion vapeur, diffusion numérique.

La thèse propose de pallier ces limites en suivant une démarche de recherche en trois parties. La première partie consiste à étendre les schémas existants dans SCONE afin de les rendre compatibles avec la

simulation de chocs forts. Une dérivation via un principe de moindre action sera utilisée à des fins de consistance thermodynamique. Dans une deuxième partie, les schémas développés seront étendus au multiphase à partir des deux modèles classiques de la littérature (iso-pression et Baer-Nunziato). Enfin, la dernière partie consistera en la réduction de la diffusion numérique des indicateurs de phase, grâce à la montée en ordre (avec limitation multidimensionnelle) des termes d'advection et une reconstruction d'interface (de type VOF-PLIC). Ces algorithmes étant classiquement coûteux numériquement, des techniques de Machine Learning seront utilisées pour accélérer l'identification de configurations d'interface.

Le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles dans le domaine de la simulation et des méthodes numériques, en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

■ Formation recommandée

Mathématiques appliquées, analyse numérique, EDP, mécanique des fluides

■ Ecole doctorale

Mathématiques et Informatique de Marseille (MIM) - Aix-Marseille Université

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

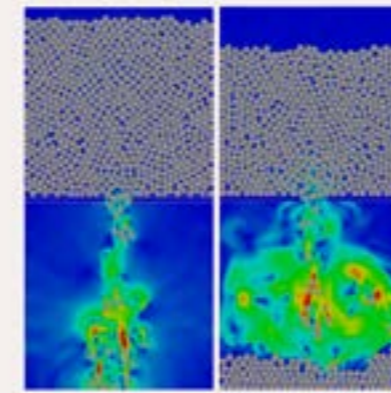
■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

■ Chercheur à contacter

CHAUVIN Rémi
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 76 69
remi.chauvin@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



Simulation numérique de particules entraînées par convection naturelle multiphasique. Application aux accidents graves des réacteurs nucléaires de 4ème génération

DTN/SMTA/LMAG

Cette thèse s'inscrit dans le cadre général des études de sûreté associées aux Accidents Graves dans les Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au Sodium.

Elle porte plus particulièrement sur la modélisation des lits de débris de corium et des phénomènes qui s'y déroulent, spécifiques à cette technologie de réacteur. Elle a notamment pour objectif de produire des modèles physiques décrivant l'auto-nivellement de ces lits en suivant une démarche de remontée d'échelle issue de la méthode dite de la moyenne volumique. En s'appuyant sur les résultats de travaux précédents, et sur un outil de simulation couplant LBM (Lattice Boltzmann Method) et DEM (Discrete Element Method), la recherche proposée suivra une démarche à deux échelles. Il s'agit tout d'abord de simuler les phénomènes d'intérêt à l'échelle des pores en choisissant les problèmes de fermeture les plus significatifs. La remontée d'échelle sera ensuite mise en œuvre afin de proposer de nouvelles lois physiques pour les propriétés effectives du lit de débris les plus influentes. Le travail effectué ici dans le cadre de la sûreté des réacteurs rapides au sodium est générique et l'établissement de la méthodologie permettant de déterminer des relations de fermetures (ici propriétés

effectives du milieu) pour un outil numérique à plus grand échelle est novateur et trouvera des applications dans de nombreux autres contextes traitants des problématiques liées aux interactions fluide/grains.

Ces travaux s'inscrivent aussi dans un contexte de renouveau du nucléaire avec une floraison de start-up basés sur des réacteurs au sodium et une collaboration avec le Japon sur la sûreté de ce type de réacteur.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

■ Formation recommandée

Master 2 ou Diplôme d'ingénieur en énergie ou simulation numérique

■ Ecole doctorale

Ingénierie - Matériaux - Environnement - Énergétique - Procédés - Production (IMEP2) - Grenoble INP

■ Date souhaitée de début de thèse

01/10/2024

■ Lieu de recherche

Centre CEA de Cadarache

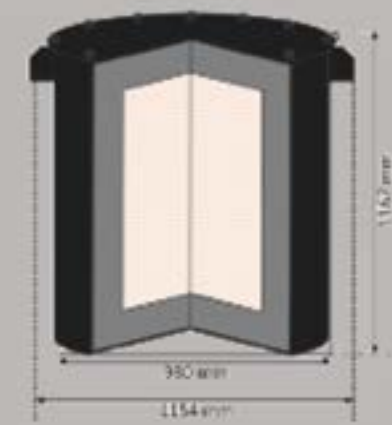
■ Directeur de thèse

SEILER Nathalie
CEA

■ Chercheur à contacter

CLAVIER Rémi
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 43 74
remi.clavier@cea.fr

[Retour au sommaire](#)



© CEA



Utilisation de méthodes bayésiennes pour la localisation de matière nucléaire en milieu hétérogène par interrogation photonique active

DTN/SMTA/LMN

La caractérisation des déchets radioactifs issus de l'industrie nucléaire est essentielle pour garantir leur gestion durable, dans le respect de la réglementation française. Le CEA développe des méthodes utilisant la mesure de rayonnements ionisants pour vérifier le contenu des colis de déchets.

L'interrogation photonique active (IPA) est une technique non destructive bien adaptée aux déchets compactés de gros volume, pour lesquels les autres techniques sont mises en défaut. On utilise un faisceau interrogateur de photons de haute énergie capables de faire fissionner la matière nucléaire afin d'en estimer la quantité. L'enjeu actuel est de progresser sur la localisation rapide de la matière au sein du colis, pour pouvoir ensuite appliquer des techniques de spectrométrie focalisées pour identifier les produits de fission. Il s'agit d'un problème inverse consistant à déterminer les caractéristiques d'une source de rayonnement (créée par photofission) à partir d'un ensemble limité de mesures.

L'objectif est de développer un formalisme bayésien pour traiter ce problème de localisation dans des cas réalistes en prenant en compte les incertitudes liées aux données nucléaires, au flux interrogateur, aux mesures elles-mêmes et aux caractéristiques du déchet (densité, composition). On étudiera des cas de complexité croissante : milieu homogène, puis hétérogène, introduction de la carte des densités

du milieu en 3D obtenue par tomodensimétrie X et enfin présence de plusieurs sources. La validation expérimentale reposera sur les moyens expérimentaux du Laboratoire de Mesures Nucléaires (LMN) du CEA Cadarache où se déroulera la thèse, notamment la cellule d'irradiation CINPHONIE pourvue d'un LINAC à électrons de 15 MeV, des échantillons de matière nucléaire et des colis de déchets maquettes.

Le travail proposé ouvre des perspectives professionnelles en particulier vers les centres de recherche et les départements de R&D dans l'industrie.

Un stage de master 2 est proposé par l'équipe en complément de la thèse.

■ **Formation recommandée**
Master 2 recherche

■ **Ecole doctorale**
Ecole Doctorale de Physique de Grenoble (EdPHYS) - Université Grenoble Alpes

■ **Date souhaitée de début de thèse**
01/10/2024

■ **Lieu de recherche**
Centre CEA de Cadarache

■ **Directeur de thèse**
CARASCO Cédric
CEA

■ **Chercheur à contacter**
GESLOT Benoit
IRESNE - l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone
04 42 25 26 67
benoit.geslot@cea.fr

[Retour au sommaire](#)