



2027

IRESNE
SUJETS
DE STAGES

IRESNE INTERNSHIP SUBJECTS

+110 SUJETS / SUBJECTS

iresne@cea.fr
04 42 25 20 71

IRESNE – bât 707
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lez-Durance



iresne



Sommaire / Summary

- **Présentation de l'IRESNE / About IRESNE**
- **IRESNE : Un institut du CEA à Cadarache / IRESNE : a CEA Institute at Cadarache**
- **Les stages à l'IRESNE en pratique / IRESNE Internships in practice**
- **Les sujets de stage du Département d'études des combustibles – DEC /**
Internship subjects at Fuel Studies Departement
- **Les sujets de stage du Département d'études des réacteurs – DER /**
Internship subjects at Reactor Studies Departement
- **Les sujets de stage du Département de technologie nucléaire – DTN /**
Internship subjects at Nuclear Technology Departement



Sommaire / Summary

Département d'étude des combustibles Fuel Studies Department

1. Développement et qualification de mesures hautes températures/ Application au point de fusion du combustible nucléaire
2. Mesure et modélisation de la distribution de température dans un prototype de combustible nucléaire innovant
3. Sur la trace des radioéléments relâchés par le combustible nucléaire
4. Cartographie de la densité de compacts d'UO₂ : caractérisation expérimentale en soutien à la modélisation pour le combustible RNR
5. Fabrication de combustibles CERMET microcellulaires à base d'UO₂ : lien entre microstructure et propriétés thermiques
6. Formulation de pâtes d'impression CERMET UO₂/Mo par un procédé de fabrication additive
7. Etude numérique de la compression d'un assemblage granulaire : effet de taille et de forme des grains
8. Couplage DEM-BLM pour la simulation des milieux granulaires non saturés
9. Modélisation DEM du pressage d'un milieu granulaire fragmentable en condition périodique annulaire en contexte RNR
10. Simulation du comportement thermomécanique du combustible E-ATF CERMET microcellulaire
11. *Simulation of the thermomechanical behavior of E-ATF CERMET micro-cell fuel*
12. Calculs préliminaires du comportement sous irradiation de combustibles MOX type RNR issus de procédés de fabrication distincts
13. *Preliminary calculations of the irradiation behavior of RNR-type MOX fuels from different manufacturing processes*
14. Optimisation de calcul GERMINAL pour les combustibles MOX à forte teneur en Pu: l'aiguille TRABANT 2/2
15. *Optimization of the GERMINAL calculation for MOX fuels with high Pu content: the TRABANT 2/2 pin*
16. Préconception thermomécanique des assemblages combustibles RNR-Na dans la plateforme POSTER
17. Modélisation hydrodynamique de l'éjection de combustible fondu
18. Méthodologie d'analyse des incertitudes pour la thermomécanique des aiguilles de réacteurs à neutrons rapides



Sommaire / Summary

Département d'étude des combustibles Fuel Studies Departement

19. Améliorer la modélisation du combustible UO_2 grâce à l'apprentissage automatique des interactions diélectriques à longue portée
20. *Advancing the modeling of UO_2 fuel through the machine-learning of long range dielectric interactions*
21. De l'Angström au micron: un modèle d'évolution microstructurale du combustible nucléaire dont les paramètres sont calculés à l'échelle atomique
22. *From Angstrom to micron: building a model for the fuel in-pile evolution based on data calculated at the atom level*
23. Evaluation de potentiels interatomiques machine-learning 'universels' pour la simulation de combustibles nucléaires
24. *Probing Foundational Machine-Learning Interatomic Potentials for Nuclear Fuel Material Simulations*
25. Développement de méta-modèles pour la prédiction de propriétés de coriums prototypes par Processus Gaussien
26. *Generating Meta-Models for Prototypical Corium properties using Gaussian Process Regression and Multi-fidelity Databases*
27. Modélisation multiéchelle des gaz de fission pour un jumeau numérique d'expériences sur les combustibles nucléaires
28. *Multiscale modeling of fission gas behavior toward a digital twin of nuclear fuel experiments*
29. Descripteurs atomiques pour la modélisation par intelligence artificielle des combustibles nucléaires
30. *Atomic descriptors for AI-driven modeling of nuclear fuels*
31. Étude par dynamique moléculaire de l'interaction entre défauts étendus et pointe thermique dans les combustibles UO_2 et MOX
32. *Molecular dynamics study of the interaction between extended defects and thermal spikes in UO_2 and MOX fuels*
33. Analyse numérique d'essais de rupture du dioxyde d'uranium par chauffe laser
34. *Numerical analysis of uranium dioxide fracture tests induced by laser heating: sensitivity analyses and design of new experiments*



S o m m a i r e / S u m m a r y

Département d'étude des combustibles *Fuel Studies Department*

- 35. Développement et Vérification des Codes de Thermomécanique MFEM/MGIS et Manta pour la modélisation de la rupture des matériaux fragiles
- 36. *Development and Verification of the MFEM/MGIS and Manta Thermomechanical Codes for Modelling the Fracture of Brittle Materials*
- 37. Trains de Tenseurs Quantiques pour la simulation multiéchelle
- 38. *Quantized Tensor Trains for multiscale simulation*
- 39. Méthodes de Trains de Tenseurs Quantiques pour le transfert radiatif
- 40. *Quantized Tensor Train Methods for Radiative Transfer*
- 41. Analyse de composés organiques dans des matrices du nucléaire



Sommaire / Summary

Département d'étude des réacteurs *Reactor Studies Department*

- 42. Etudes neutroniques et thermo-hydrauliques des dispositifs FUSERO
- 43. Caractérisation accélérée des effets en réactivité dans le RJH grâce au machine learning
- 44. Caractérisation neutronique et thermohydraulique de l'élément combustible du RJH
- 45. Développement et validation d'un outil simplifié, dédié à la conception de RNR-Na, modélisant la fusion du combustible et la rupture de la gaine lors d'une excursion de puissance
- 46. Etude du fonctionnement d'un concept de réacteur à sel fondu incinérateur de déchets nucléaires avec le code CATHARE3
- 47. *Validation of thermal-hydraulics and neutronics coupled Molten Salt Reactor system code with CATHARE3*
- 48. Prédimensionnement de la chaudière des réacteurs RNR-Na par l'intégration d'estimateurs de sûreté globaux
- 49. Optimisation de la stabilité du réseau électrique sous contraintes physiques dans le calcul d'un mix énergétique
- 50. Détermination de la fiabilité d'un système passif de SMR
- 51. Benchmark entre les codes CATHARE3 et DYN4G sur un transitoire accidentel de RNR-Na
- 52. Simulation numérique et optimisation avec machine learning de méthodes de remontée d'échelle pour un écoulement Na en ébullition
- 53. *Numerical simulation and upscaling methods optimization using machine learning for a boiling Na flow*
- 54. Modélisation du Réacteur Expérimental PULSTAR avec le Code de Thermohydraulique CATHARE3
- 55. Cycle de conversion d'énergie au CO₂ supercritique : développement d'un modèle MODELICA du compresseur et de son pilotage en flexibilité
- 56. Propulsion nucléaire spatiale : études et optimisation de « concepts of operation » pour des missions habitées vers Mars
- 57. Modélisation du cycle de conversion d'énergie d'un REP avec CATHARE3



S o m m a i r e / S u m m a r y

Département d'étude des réacteurs Reactor Studies Department

- 58. Etude des performances de scintillateurs fibrés à base de pérovskite organique-inorganique pour réaliser la spectrométrie d'un champ neutronique
- 59. Study of the performance of organic-inorganic perovskite-based fiber scintillators for neutron field spectrometry
- 60. Modélisation des chambres à fission pour une utilisation à haut flux neutronique
- 61. Simulation de plasmas nucléaires pour l'instrumentation de RNR-Na
- 62. Étude neutronique du réacteur nucléaire CABRI
- 63. Qualification d'un système de mesure nucléaire pour le réacteur CABRI
- 64. Développement logiciel pour une baie d'acquisition modulaire en réacteur de recherche
- 65. Supervision du réseau d'acquisition temps réel du réacteur CABRI
- 66. Validation du couplage APOLLO3®-SIMMER-V pour le traitement de configurations dégradées au cours d'accidents graves de RNR-Na
- 67. Modélisation des expériences de mesure de la puissance résiduelle au CLAB avec les codes APOLLO3 et MENDEL
- 68. Dynamic pairing in nuclear fission
- 69. Etude de l'impact des données nucléaires sur la caractérisation de l'inventaire isotopique d'un crayon irradié
- 70. Impact study of nuclear data on the isotopic inventory caraterization of an irradiated fuel rod
- 71. Etude comparée du processus de fission via l'analyse des réactions : $^{233,235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$, $^{239,241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$ et $^{241}\text{Am}(n_{\text{th}},f)$
- 72. Résolution par minimisation sous contraintes du problème TAR (Target Accuracy Requirements) – Applications physiques
- 73. Amélioration de la modélisation des couvertures fertiles de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na)
- 74. Parameter reduction on nuclear mass models
- 75. Quantification des incertitudes dans la modélisation multiphysique



S o m m a i r e / S u m m a r y

Département d'étude des réacteurs *Reactor Studies Department*

- 76. Validation of APOLLO3® SCRAP calculation route for depletion calculations of small fast reactor core
- 77. Spectral Analysis and Reduced-Order Methods in Reactor Kinetics: Application to the MUSE4 Experiment
- 78. Analyse neutronique de l'expérience STEK pour la validation des outils de calcul scientifique
- 79. Sûreté-criticité : vers une méthodologie d'exploitation optimisée de la validation expérimentale
- 80. Pré-dimensionnement d'une mesure de section efficace de capture neutronique du Xénon-135
- 81. Developing new methods for neutronics validation and multi-physics modeling of GEN IV reactors with the INCA platform
- 82. Méthodes statistiques pour la modélisation de scénarios électronucléaires
- 83. Modélisation neutronique des cœurs de type VVER-1000
- 84. Amélioration des méta-modèles par réseaux de neurones pour les scénarios électronucléaires de parcs mixtes REP / RNR
- 85. Perturbation theory and kinetic calculations: an application with the PRATIC benchmark
- 86. Simulation de l'irradiation de transmutation SUPERFACT (PHENIX) avec APOLLO3
- 87. Calcul de criticité de pour les scénarios électronucléaires
- 88. Analyse de l'identifiabilité et méthodes d'estimation robustes pour l'analyse du bruit neutronique par modèles lorentziens
- 89. Recherche de chaînes d'évolution simplifiées appliquées à l'estimation de la puissance résiduelle
- 90. Ajustement des coefficients de diffusion à l'aide des flux du transport
- 91. Mise en place d'un schéma hétérogène neutronique-thermohydraulique
- 92. Développement d'un modèle de calcul cœur REP pour l'évolution de sources neutroniques de démarrage



S o m m a i r e / S u m m a r y

Département de technologie nucléaire Nuclear Technology Departement

- 93. Utilisation d'outils de Deep Learning/Computer Vision pour analyser les images radioscopiques d'un mélange triphasique
- 94. Use of Deep Learning and Computer Vision tools to analyse radiographic images of a three-phase mixture
- 95. Développement d'un schéma MUSCL pour la simulation des écoulements compressibles multifluides
- 96. Development of a MUSCL Scheme for the Simulation of Compressible Multifluid Flows
- 97. Étude numérique d'un dispositif VITI-MPB : dynamique des bulles et amélioration de la modélisation
- 98. Numerical study of the VITI-MPB device: bubble dynamics and model improvement
- 99. Automatisation et mise en place d'une base de non régression pour THEMA, code d'étalement du corium, sur la base d'essais expérimentaux et analytiques pour la sûreté des réacteurs nucléaires
- 100. Simulation rapide de la fusion d'une paroi : apport du Machine Learning
- 101. Fast simulation of th wall fusion using Machine Learning
- 102. Simulation numérique d'écoulements granulaires immergés (couplage DEM-LBM)
- 103. Validation numérique de modèles thermiques de rayonnement et de conduction pour évaluer les conséquences de l'assèchement d'un cœur de réacteur
- 104. Numerical validation of thermal radiation and conduction models to assess the consequences of a reactor core drying-out
- 105. Modélisation numérique de la croissance de dépôts poreux en conditions nucléaires: de l'observation microscopique à la génération de géométries 3D réalistes
- 106. Développement et qualification de l'application ARODE pour la reconstruction spectrale neutronique avec des sphères de Bonner



S o m m a i r e / S u m m a r y

Département de technologie nucléaire *Nuclear Technology Department*

- 107. Simulations numériques de sondes gamma pour la prospection minière et établissement par Machine Learning de modèles de prédiction de la teneur en uranium
- 108. Utilisation d'agents IA pour automatiser des calculs Monte Carlo
- 109. Méthode primale-duale proximale pour l'estimation conjointe de l'objet et de paramètres inconnus en tomographie
- 110. Etude des formulations de dépôt d'aérosols et de gaz à prendre en compte pour la modélisation de la dispersion atmosphérique
- 111. Descente d'échelle statistique 3D des vents de vallée à échelle hectométrique
- 112. Modélisation d'ensemble de la dispersion de radionucléides en cas de rejet accidentel dans l'atmosphère
- 113. Conception mécanique de sections d'essais
- 114. Modélisation numérique de la magnéto-convection dans les couvertures tritigènes pour les réacteurs de fusion
- 115. Simulation numérique instationnaire de canaux d'échanges TPMS
- 116. Etude de dimensionnement thermomécanique RCC-MRx d'un dispositif d'irradiation expérimental
- 117. R&D Acoustique Prototypage d'une méthode innovante de détection de fuites
Méthode de reconstruction par IA d'un domaine conducteur en tomographie d'impédance électrique
- 118. Conception d'un dispositif expérimental pour l'étude thermo-hydraulique du phénomène de flashing intervenant dans les générateurs de vapeur au passage des plaques entretoises
- 119. Définition d'une manipulation expérimentale pour l'étude du renoyage par le haut à haute température

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'Energie bas carbone. Créé le 1er février 2020 par le CEA, l'IRESNE rassemble une équipe de 1000 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'Energie (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. L'IRESNE est composé de trois départements de recherche spécifique portant sur les études des combustibles, les études des réacteurs et la technologie nucléaire.

Au total, 34 laboratoires de R&D œuvrent au sein des départements de R&D de l'IRESNE.

Découvrez l'IRESNE sur son site internet : [**IRESNE – Accueil**](#)

Découvrez les 34 laboratoires qui composent l'IRESNE : [**IRESNE – Les 34 laboratoires de l'IRESNE.**](#)



About IRESNE

*Research
institute on
nuclear systems
for low-carbon
energy
production*

IRESNE is the Institute for Research on nuclear systems for low-carbon energy production. Created on 1 February 2020 by the CEA, IRESNE brings together a team of 1000 employees who design, simulate, test and qualify current and future nuclear reactors.

IRESNE is also opening up its field of research to the integration of nuclear systems into the low-carbon energy mix.

In addition to producing electricity, nuclear power is also a source of heat.

It is the technological innovations that support these two components - electricity and heat - that the institute focuses on in its research.

The aim of this optimization is to provide society with an energy mix that draws on all low-carbon resources.

The creation of the institute is part of the establishment, within CEA, of an organization dedicated to studies on decarbonized energies. This organization responds to the French government's desire to create a decarbonized energy mix based on nuclear power and renewable energies. The objectives are set by the French government within the framework of the Energy Transition Law for Green Growth and the Pluriannual Energy Programming (PPE) laws. These laws ensure the implementation of the National Low-Carbon Strategy (NLCS), France's roadmap for reducing greenhouse gas emissions. The NLCS concerns all sectors of activity and must be supported by everyone: citizens, local authorities and businesses.

Accordingly, the CEA has established a Directorate of Energy (DES), which includes the IRESNE institute. IRESNE consists of three specialized research departments focusing on fuel research, reactor research, and nuclear technology. In total, 34 R&D laboratories operate within IRESNE's R&D departments.

Learn more about IRESNE on its website: [IRESNE's website - Welcome](#)



Labo UO2 : fabrication additive imprimante 3D. Pièce en alumine réalisée par fabrication additive. La pièce imprimée comporte une croix centrale en creux. Après impression, séchage et déliantage, la pièce a été frittée pour rendre la céramique pratiquement totalement dense.

©A.Aubert /CEA

Labo UO2: additive manufacturing 3D printer. Alumina part produced by additive manufacturing. The printed part features a recessed central cross. After printing, drying and debinding, the part was sintered to make the ceramic almost completely dense.

©A.Aubert /CEA



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>



IRESNE: A CEA institute at Cadarache

Located in the Provence Alpes Côte d'Azur region, in the commune of Saint-Paul lez Durance, the CEA-Cadarache center is at the heart of the energy transition with its research institutes and experimental platforms in the field of low-carbon energies: nuclear energy (fission, fusion), bioenergies and solar energies.

In addition to this research, CEA-Cadarache is also involved in nuclear propulsion for the French Navy, fundamental research in biosciences and biotechnologies, and studies on the decommissioning and dismantling of nuclear facilities and nuclear safety. Three institutes are actively involved in Cadarache research.

The mission of the CEA-IRESNE is to research and develop innovations in the field of nuclear fission energy (in particular reactors and nuclear fuels) as part of a low-carbon energy mix.

The institut for magnetic fusion research is working on fusion as a potential energy source for the future. Together with its international partners, the institute operates the WEST tokamak to prepare for future experiments on the international thermonuclear experimental reactor ITER.

The Aix-Marseille Institute of Biosciences and Biotechnologies (BIAM) explores two themes: the response mechanisms of living organisms (plants, algae, bacteria) to environmental constraints, and the bioconversion of energy to produce high-energy molecules.

CEA-Cadarache employs 2,400 people and is home to world-renowned research facilities, including the Jules Horowitz Reactor (RJH) currently under construction, the WEST/Tore-Supra tokamak, test bench for Iter, and the Cité des Energies.

The internships presented in this booklet are proposed by IRESNE, and all relate to the scientific and technological challenges facing the Institute. As indicated on some subjects, it may be possible to pursue a thesis at the end of the internship.

The international recognition of its researchers, the scientific quality of the studies carried out, combined with the uniqueness of the digital and experimental platforms of the Cadarache Research Center laboratories, offer future trainees a first-rate working environment for a successful internship. This will enable them to develop high-level skills that will be of great value to their career development.

Discover all CEA-Cadarache internship offers on : <https://www.emploi.cea.fr>



Plateforme POSEIDON : Vue de la section
d'essai (contenant la maquette de
l'assemblage combustible) de la boucle
HERMES P.

©A.Aubert /CEA

POSEIDON platform: View of the test section
(containing the fuel assembly mock-up) of
the HERMES P loop.

©A.Aubert /CEA



Les stages à l'IRESNE en pratique

Choisir de faire son stage à l'IRESNE, sur le centre de Cadarache, c'est aussi faire le choix d'une qualité de vie de haut niveau.

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 900 hectares où de nombreuses espèces animales vivent en liberté.

Les étudiants stagiaires de niveau Bac + 5 reçoivent une indemnité de stage mensuelle de 1400 €.

Une participation du CEA aux frais de logement, en cas de location pour la durée du stage, est possible, le stagiaire peut aussi demander les APL.

Un large choix de logements dans les 4 départements environnants s'offre aux stagiaires : 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, ...

La résidence « Le hameau » située à la sortie du Centre de Cadarache propose des studios à la location. Adresse : Habitat Pluriel Résidence Le Hameau – 13115 Saint-Paul lez Durance, Téléphone 04 42 57 43 83.

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 étudiants.



IRESNE internships in practice

Choosing to do an internship at IRESNE, at the Cadarache center, also means choosing a high quality of life.

The Cadarache Research Center, located in the commune of Saint-Paul-Lez-Durance (Bouches-du-Rhône), is ideally situated, 30 min from Aix-en-Provence, 1 h from the sea and 1 h 30 from the nearest ski resorts. It extends over a 900-hectare park planted with trees, where numerous animal species roam freely.

Trainees at Bac + 5 level receive a monthly internship allowance from €1,400,

If the trainee rents accommodation for the duration of the course, the CEA may contribute to the accommodation costs. Trainees may also apply for housing benefit (APL).

A wide choice of accommodation in the 4 surrounding departments is available to trainees: for city dwellers, the towns of Aix en Provence (30 minutes by freeway), Pertuis (20 minutes by road), Manosque (10 minutes by freeway); for country lovers, the villages of Luberon, Var, Alpes de Haute Provence, ...

"Le Hameau" residence, just outside the Cadarache center, offers studio flats for rent. Address: Habitat Pluriel Résidence Le Hameau - 13115 Saint-Paul lez Durance, Telephone 04 42 57 43 83
The Cadarache Center is served morning and evening by buses departing from several towns and villages in départements 04, 13, 83 and 84. These buses are free of charge for people coming to work at the Center.

Two company restaurants are available at preferential rates for students.





Plateforme POSEIDON : Boucle
COLENTec. Intervention sur la
tuyauterie du circuit primaire

©A.Aubert /CEA



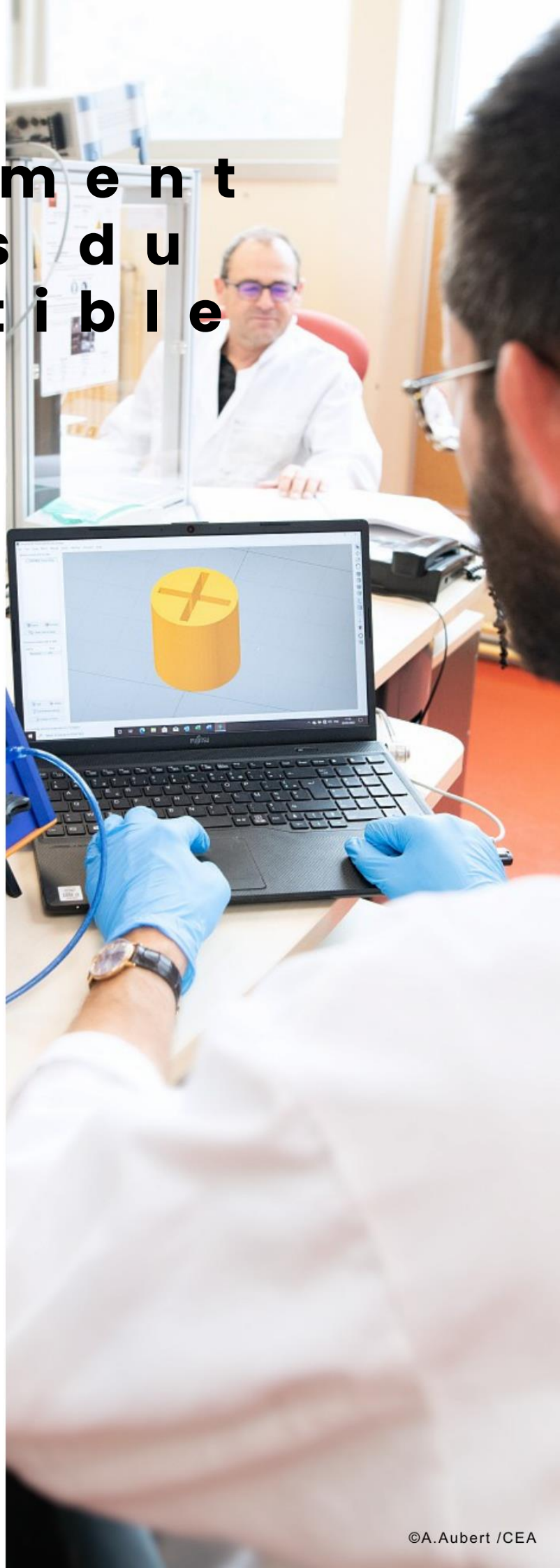
D é p a r t e m e n t d ' E t u d e s d u C o m b u s t i b l e

Le Département d'Etudes 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'Expérimentations et d'Examens des combustibles (SA3E),
- le Service d'Etudes et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC),
- le Service d'Exploitation et de Traitements des Combustibles (SETC).



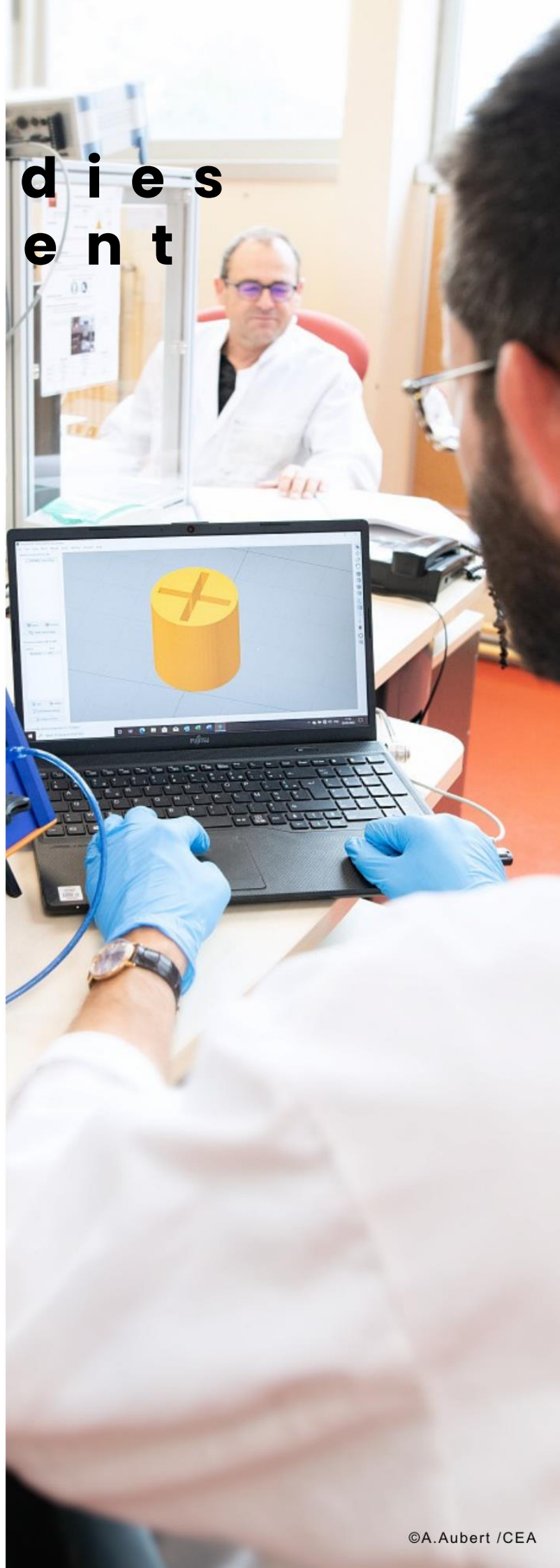
Fuel Studies Department

The Fuel Studies Department (DEC in french) focuses on nuclear fuel, with the aim of improving the performance and safety of current reactors (generations 2&3) and developing nuclear fuels for the reactors of the future (4th generation).

Its mission is to acquire, integrate and capitalize on knowledge relating to the design, manufacture, characterization and study of the behavior of nuclear fuel elements in reactors. The DEC's activities combine numerical simulation/modeling and experimentation.

DEC is organized into three units:

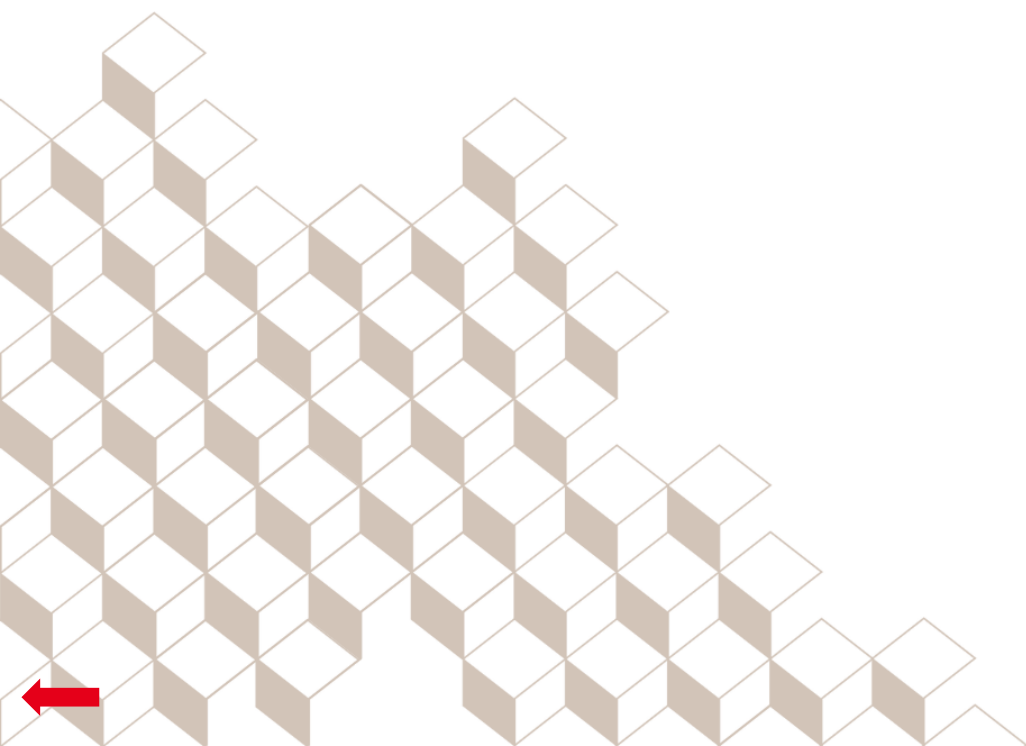
- Analysis, Elaboration, Experimentation and Examination of Fuels Unit (SA3E).
- Studies and Simulation of Fuel Behavior Unit (SESC),
- Operating and Fuel Treatment Unit (SETC).

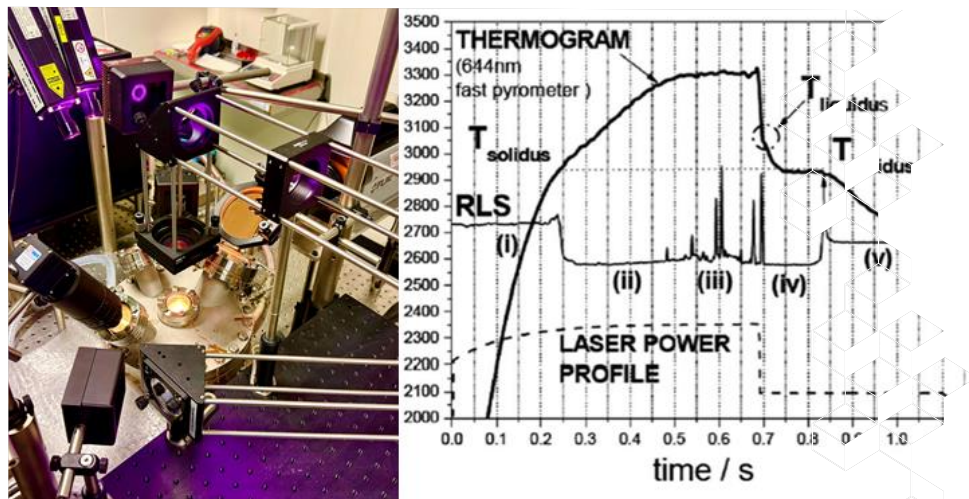


S A 3 E

Service d'analyses,
d'élaboration,
d'expérimentations
et d'examens des
combustibles

*Analysis, Elaboration, Experimentation
and Examination of Fuels Unit*





Développement et qualification de mesures hautes températures/ Application au point de fusion du combustible nucléaire

DEC/SA3E/LAMIR

Ce stage au sein du Laboratoire d'Analyse de la Migration des Radioéléments (LAMIR) vise à mettre en place une méthode de mesure de la température de fusion de céramiques nucléaires. Le travail se déroulera autour des plateformes laser développées dans le cadre de la collaboration CEA-Institut Fresnel (Marseille)

Contexte

Dans les études de sûreté, l'absence de fusion du combustible est une exigence qui doit être démontrée dans les différentes situations de fonctionnement des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Les études mettant en œuvre des Outils de Calcul Scientifique (OCS) visent à démontrer que la température atteinte dans le combustible doit être maintenue inférieure à la température de fusion du combustible dans les différentes situations de fonctionnement des réacteurs. La démarche de sûreté mise en œuvre actuellement permet de garantir l'absence de fusion du combustible moyennant la prise en compte de marges en puissance suffisantes, mais les recherches et une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu peuvent permettre de proposer une optimisation de l'exploitation du parc actuel.

Le CEA, en collaboration avec l'Institut Fresnel, développe depuis des années plusieurs plateformes laser permettant la caractérisation du comportement du combustible nucléaire à très haute température.

Le stage vise à mettre en place une méthode de mesure dédiée à la caractérisation des températures de fusion du combustible nucléaire (~2800°C). En particulier, ce stage se focalisera sur la mesure de température par thermographie/pyrométrie infrarouge et sur la validation de la chaîne de mesure.

Objectifs:

- Développer et qualifier une méthode permettant la mesure de la température de transition de phase du combustible nucléaire de type « Thermal arrest ». Cette technique est basée sur la détection de la chaleur latente de fusion en analysant la cinétique d'échauffement ou de refroidissement. D'autres techniques pourront être envisagées en complément.

Missions principales

- Sur la base de travaux existants, mise en place du système optique, basé sur des lasers de puissance, permettant une chauffe contrôlée jusqu'à la température de fusion d'échantillons de références (point fixes thermodynamiques) et sur céramique nucléaire.

- Analyse des résultats expérimentaux (précision et incertitude de mesures) en lien avec les résultats de simulation et la littérature internationale sur des matériaux de référence ou de combustible vierge

Apport du stage pour le(la) candidat(e)

Au cours du stage, le(la) candidat(e) sera accueilli(e) dans le Laboratoire d'Analyse de la migration des radioéléments (LAMIR) du Service d'analyses, d'élaboration, d'expérimentations et d'exams des combustibles (SA3E) de l'institut IRESNE du CEA cadarache.

Le(la) candidat(e) pourra acquérir durant ce travail des compétences en interaction laser/matière et en expérimentation. Un intérêt particulier sera porté à la mesure de température par thermographie/pyrométrie infrarouge et sur la validation et la détermination des incertitudes de la mesure. De nouvelles méthodes de mesure pourront être investiguées (pyrométrie UV ou multi-spectrale). Il (Elle) sera également en mesure d'utiliser des outils de calcul (méthode aux éléments finis) en support au prédimensionnement des expériences.

Ce stage sera mené dans un cadre collaboratif entre le LAMIR (Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone IRESNE) et l'équipe ILM (Interaction Laser Matière) de l'Institut Fresnel de Marseille, qui apportera son expertise dans l'utilisation des lasers fortes puissances et sur l'étude des matériaux en conditions extrêmes. L'étudiant(e) aura à sa disposition l'ensemble des moyens expérimentaux nécessaires et pourra s'appuyer sur les compétences expérimentales et en simulation présentes au sein du laboratoire. Pour finir, ce stage sera également mené en collaboration avec le Service d'Etudes et de Simulation du Comportement des combustibles (IRESNE/ SESC). L'étudiant(e) intégrera donc une équipe multidisciplinaire et diverse et devra faire preuve d'une capacité à communiquer et à interagir avec tous les acteurs du projet.

Ce stage pourrait idéalement se prolonger par une thèse de doctorat.

Formation souhaitée :

Ingénieur généraliste, Optique, métrologie, instrumentation, matériaux

Durée du stage :

6 mois

Méthode/logiciel(s):

Eléments finis, Comsol

Mots clés :

Combustible nucléaire, Expériences, laser, optique

Possibilité de thèse :

Oui

Contact :

Matthieu Reymond
matthieu.reymond@cea.fr

Veronica D'Ambrosi
veronica.dambrosi@cea.fr

Mesure et modélisation de la distribution de température dans un prototype de combustible nucléaire innovant

DEC/SA3E/LAMIR

Dans le cadre du PEPR DIADEM, le SA3E développe une méthode de qualification des combustibles nucléaires accélérée, basée sur l'utilisation du chauffage laser pour simuler la thermique du combustible en réacteur. Le stage consistera à mettre en œuvre cette stratégie sur des prototypes élaborés par fabrication additive sur la base d'un brevet CEA.

Le PEPR DIADEM (Programme et Équipements Prioritaires de Recherche Dispositifs Intégrés pour l'Accélération du Déploiement de Matériaux Émergents) vise à l'accélération de la recherche en sciences des matériaux. Un des axes de cette accélération, porté par le projet Fast-in Fuel, consiste à mettre en œuvre une démarche de qualification de combustible nucléaire en limitant le recours à des irradiations dans un réacteur nucléaire. Dans l'axe 4 de Fast-in-Fuel, on vise à reproduire le gradient de température vu en réacteur par un combustible innovant au moyen d'un chauffage laser, et de qualifier ainsi ses performances thermiques sans recourir à une irradiation.

L'objectif de ce stage consistera à mettre en œuvre la méthodologie de l'axe 4 pour un combustible innovant breveté par le CEA. Pour ce faire, l'étudiant disposera de prototypes et de mini-échantillons du combustible innovant élaborés par fabrication additive.

Dans un premier temps l'étudiant participera aux expériences de chauffage laser sur les prototypes. Ces essais consisteront en des chauffes lentes et rapides, qui simuleront le comportement dans différentes situations (normales et accidentelles). Lors de ces essais la distribution de température à la

surface de l'échantillon sera mesurée avec une caméra thermique.

La seconde partie du stage consistera à modéliser le comportement thermomécanique du prototype, et à comparer cette modélisation aux profils de température effectivement mesurés. Les résultats du calcul mécanique seront exploités pour évaluer la résistance à la rupture du prototype en conditions réacteur. Cette modélisation sera effectuée avec des propriétés thermomécaniques dont la valeur sera déterminée sur les mini-échantillons.

Le stage se déroulera sur les sites du CEA-Cadarache au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone et de l'Institut Fresnel de l'Université Aix-Marseille, où le stagiaire bénéficiera du support des techniciens et ingénieurs des deux laboratoires pour mener à bien son étude.

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur

■ Durée du stage :

5-6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Modélisation avec
SOLIDWORKS/ COMSOL

■ Mots clés :

Chauffage laser, modélisation

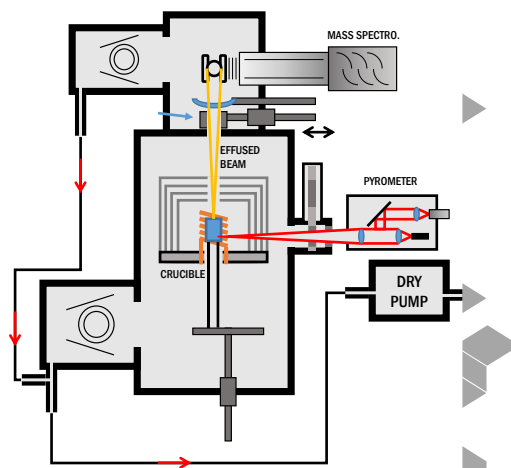
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Desgranges Lionel
Lionel.desgranges@cea.fr





Sur la trace des radioéléments relâchés par le combustible nucléaire

DEC/SA3E/LAMIR

Pour améliorer la sûreté des réacteurs nucléaires, le CEA-Cadarache et le JRC-Karlsruhe étudient le combustible nucléaire pendant une rampe de température avec des dispositifs expérimentaux différents. L'objectif du stage est de valoriser la complémentarité des deux approches en comparant les résultats obtenus dans chaque équipe.

Le stage s'effectuera sur le site du CEA-Cadarache au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone et celui du JRC-Karlsruhe. Il débutera par une période de deux semaines au CEA-Cadarache, où l'étudiant se familiarisera avec le dispositif MERARG, qui mesure le relâchement des gaz de fission quand un tronçon de 14 mm de crayon combustible irradié est chauffé dans un flux de gaz neutre.

Ensuite, le stagiaire se rendra au JRC-Karlsruhe où il restera la plus grande partie du stage. Il se familiarisera avec la technique KEMS (Knudsen Effusion Mass Spectrometry, spectrométrie de masse à effusion de Knudsen), qui permet d'analyser les espèces gazeuses libérées par un échantillon de combustible irradié de quelques milligrammes chauffé sous vide et d'en suivre l'évolution en fonction du temps et des conditions expérimentales.

Une première partie du travail sera consacrée à l'analyse de la base de données des résultats KEMS. Il s'agira en particulier de caractériser le relâchement des produits de fission volatils, notamment le césium, en fonction du relâchement des produits de fission gazeux, notamment le xénon. Un stage

précédent a en effet mis en évidence sur une base de données restreinte, que le césium était relâché lorsque des relâchements de xénon étaient observés, avec toutefois des intensités de relâchement différentes pour les deux éléments. Il s'agit maintenant d'étendre ces résultats sur une base de données plus large pour essayer d'en tirer des corrélations qui permettront de mieux comprendre la relation entre le relâchement des produits de fission gazeux et volatils.

La seconde partie du travail consistera à dimensionner une expérience avec le KEMS sur un échantillon, dont un alter ego aura été mesuré avec MERARG. Cette expérience visera à faire une comparaison au plus proche entre une expérience KEMS et une expérience MERARG. Les résultats obtenus permettront d'évaluer les possibilités d'extrapolation de la base de données KEMS aux résultats MERARG et réciproquement.

Le stage s'achèvera par une semaine au CEA de Cadarache, consacrée à la présentation des travaux réalisés et à leur valorisation au sein du CEA.

■ Formation souhaitée :

École d'ingénieur ou Master 2
Chimie-physique des matériaux

■ Durée du stage :

5-6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

La maîtrise de ORIGIN et de la PCA serait un plus

■ Mots clés :

Combustible nucléaire, Gaz de fission, Césium

■ Possibilité de thèse :

NON

■ Contact :

DESGRANGES Lionel

Lionel.desgranges@cea.fr



Cartographie de la densité de compacts d' UO_2 : caractérisation expérimentale en soutien à la modélisation pour le combustible RNR

DEC/SA3E/LCU

L'existence de gradients de densité au sein de la pastille combustible crue à l'issue du pressage engendre des retraits hétérogènes pendant le frittage. Le stage proposé s'inscrit dans une étude globale qui a pour objectif de modéliser et de simuler l'étape de pressage d'un combustible de Réacteur à Neutrons Rapides afin d'estimer la carte des densités des pastilles crues.

Contexte du stage

Au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone du CEA de Cadarache, le Laboratoire des Combustibles Uranium est notamment en charge de l'élaboration et de la caractérisation de céramiques nucléaires. Il apporte également son expertise en support à la modélisation/simulation des étapes clés de la fabrication de combustibles (pastilles d' UO_2) des réacteurs civils.

Ces combustibles sont obtenus par des procédés de type métallurgie des poudres (incluant des étapes de broyage, tamisage, brassage, pressage et frittage). La compaction par pressage est la méthode de mise en forme classique des céramiques ; elle est utilisée dans de nombreux domaines industriels (pharmaceutique, agroalimentaire, métallurgie et matériaux de construction notamment).

Objectif du stage

Caractériser expérimentalement la microstructure et la densité de compacts de poudre granulée d' UO_2 après pressage, malgré leur fragilité.

Missions proposées

- Fabriquer des compacts d' UO_2 avec différentes densités (par pressage uniaxial, simple ou double effet) à partir de poudres granulées issues de différentes conditions de fabrication
- Optimiser les conditions de préparation des échantillons

(enrobage, découpe, polissage)

- Caractériser ces échantillons par thermographie infra-rouge afin de rendre compte de la distribution de densité au sein d'une pastille crue
- Optimiser le traitement des images obtenues (code Python)
- Interpréter les résultats et échanger avec les personnes chargées de la simulation de la compaction pour identifier leurs besoins en données expérimentales

Profil recherché

Intérêt marqué pour l'expérimentation

Envie d'apprendre et de contribuer à une étude concrète sur des matériaux nucléaires

Ce que vous apprendrez

Travailler dans un environnement nucléaire, au sein d'une Installation Classée Pour l'Environnement

Mener un projet de recherche en interaction avec des interlocuteurs variés (techniciens, chercheurs, exploitants d'installation)

Utiliser des outils de caractérisation

Acquérir des données expérimentales utiles pour la modélisation/simulation

Développer des compétences valorisables en science des matériaux, dans des domaines variés de l'industrie ou de la recherche

Formation souhaitée :

Matériaux

Dernière année d'école d'ingénieur ou Master 2

Durée du stage :

5 - 6 mois

Méthode/logiciel(s):

Thermographie infra-rouge, Python

Mots clés :

Céramiques nucléaires, densité, pressage, traitement d'images, thermographie IR

Possibilité de thèse :

Pas en continuité du stage, mais possibilités offertes au sein du Service

Contact :

DUGUAY Christelle
christelle.duguay@cea.fr



Fabrication de combustibles CERMET microcellulaires à base d' UO_2 : lien entre microstructure et propriétés thermiques

DEC/SA3E/LCU

Ce stage, au sein du Laboratoire des Combustibles Uranium, vise à confirmer l'intérêt des composés CERMET microcellulaires comme combustibles nucléaires innovants et à renforcer la maîtrise de leur fabrication. Le cœur de ce travail s'articulera ainsi autour de la fabrication et de la caractérisation de pastilles d' UO_2 intégrant une phase métallique au sein de la microstructure.

Contexte :

Dans les réacteurs nucléaires, le combustible est composé de pastilles de dioxyde d'uranium (UO_2) empilées dans des gaines en alliage de zirconium. Ces pastilles doivent être capables de résister à des températures élevées.

Une voie d'amélioration pourrait être l'augmentation de la conductivité thermique de la pastille par introduction d'une phase secondaire non fissile et de conductivité thermique élevée par rapport à la matrice UO_2 . Dans le cas où cette phase secondaire est métallique, le combustible composite est appelé CERMET (CERamique-METal).

Ce stage contribuera au développement d'un type de combustibles nucléaires avancés, dits CERMET microcellulaires, pour lesquels la phase métallique se présente sous la forme d'un réseau entourant des granules d' UO_2 .

Objectifs du stage :

- **Pilotage de la microstructure**

Au cours de ce stage, vous étudierez l'influence des paramètres de fabrication sur la microstructure des échantillons. En particulier, vous rechercherez une continuité du réseau métallique et une densité finale satisfaisantes des composites après frittage.

- **Optimisation des propriétés thermiques**

La performance des objets sera estimée par la mesure de leur conductivité thermique. Les valeurs obtenues seront ensuite comparées aux données de la littérature et de la modélisation.

Missions principales :

- **Contribution à la construction d'une démarche expérimentale** en s'appuyant sur la littérature scientifique et les résultats du laboratoire.

- **Fabrication d'échantillons CERMET** depuis le mélange et le broyage des poudres jusqu'au frittage de pastilles d' UO_2 incluant une phase métallique.

- **Caractérisation de la microstructure et des propriétés** des échantillons : par microscopie optique et électronique d'une part, et via des mesures de la diffusivité thermique d'autre part (Méthode flash).

- **Analyse et Interprétation des résultats** obtenus en lien avec les modélisateurs du Service d'Etude et Simulation du Combustibles.

Apport du stage pour le/la candidat(e) :

Durant ce stage, vous serez accueilli(e) sur le centre de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE) dans le Laboratoire des Combustibles Uranium.

Vous acquerez durant ce travail des compétences dans la fabrication et la caractérisation de matériaux innovants, en particulier dans le domaine des céramiques pour l'industrie nucléaire. Vous serez également capable d'utiliser différents outils de caractérisation d'une céramique, allant jusqu'à l'analyse microstructurale fine de l'objet final.

Ce stage se déroulant dans une Installation classée pour la protection de l'environnement, vous serez également familiarisé(e) avec une pratique de travail en laboratoire mettant en œuvre des matières nucléaires.

Le sujet fait ainsi appel à de multiples compétences techniques directement valorisables dans des domaines variés de l'industrie ou de la recherche (énergie, micro-électronique, industries chimique et pharmaceutique).

■ Formation souhaitée :

École d'ingénieurs, Master 2 en physico-chimie ou étude des matériaux

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Moyens de fabrication, Microscopies optique et électronique, mesure de diffusivité thermique, Python

■ Mots clés :

Matériaux nucléaires, céramiques, physico-chimie, caractérisation

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Moulin Julien
Julien.moulin@cea.fr



Formulation de pâtes d'impression CERMET UO_2/Mo par un procédé de fabrication additive

DEC/SA3E/LCU

Le Laboratoire des Combustibles Uranium dont une des missions est l'étude des procédés de fabrication de combustible nucléaire innovant est engagé dans une démarche d'évaluation d'une technologie dite de robocasting ou micro extrusion pour la réalisation de CERMET (matériau CERamique-METal)

Les procédés d'élaboration par fabrication additive (FA) de céramique sont en fort développement et cela dans de très nombreux domaines industriels. On entrevoit grâce à ces nouvelles technologies, des avancées tant par le design que par les propriétés nouvelles que l'on pourrait donner aux produits élaborés par ces moyens nouveaux.

Le Laboratoire des Combustibles Uranium (LCU) dont une des missions est l'étude des procédés de fabrication de combustibles nucléaires innovants est engagé dans une démarche d'évaluation d'une technologie dite de robocasting ou micro extrusion pour la réalisation de CERMET à base UO_2 .

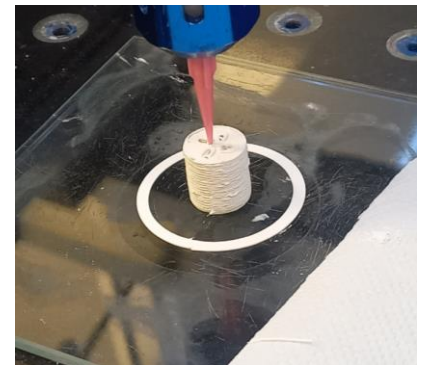
L'objectif technique recherché est une amélioration de la conductivité thermique du combustible par incorporation d'une phase métallique. Les études du procédé sont réalisées à l'aide d'une imprimante 3D prototype bimatériau.

L'impression de cermets alumine/molybdène a déjà été étudiée dans le cadre d'une thèse, qui a permis de démontrer la faisabilité du procédé. Celui-ci reste toutefois à adapter à la fabrication de combustibles nucléaires.

Pendant le stage, les thèmes suivants seront développés :

- Prise en main d'une machine d'impression par robocasting.
- Préparation des poudres adaptées au procédé.
- Caractérisations rhéologiques de formulations à l'aide d'un rhéomètre.
- Optimisation de formulations en UO_2 .
- Caractérisation des CERMET après frittage d'un point de vue microstructure mais aussi du point de vue de leurs propriétés thermiques.

Le stage se déroulera sur le site de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE) dans le Laboratoire des Combustibles Uranium (LCU).



■ Formation souhaitée :

Etudiant en Master 2 ou fin d'étude ingénieur en science des matériaux céramique ou mécanique.

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Programmation Python, logiciel d'impression Prusa, Cura

■ Mots clés :

Fabrication additive, Robocasting, CERMET

■ Possibilité de thèse :

Oui au sein du service sur d'autres thématiques matériaux

■ Contact :

FIQUET Olivier
olivier.fiquet@cea.fr

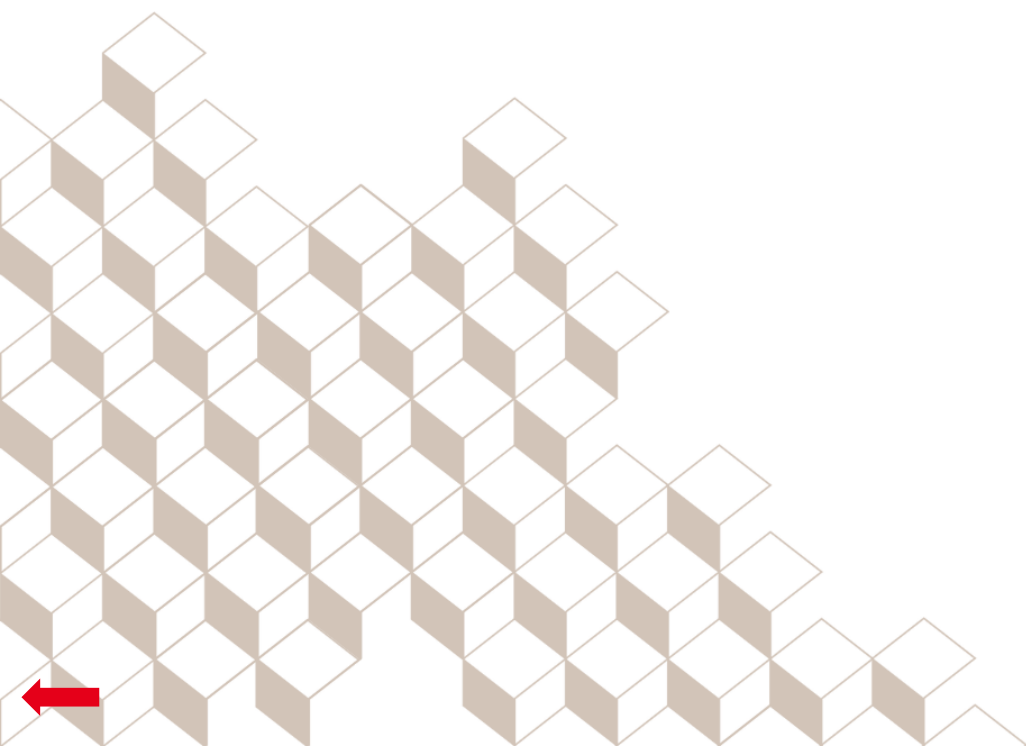
MESTRALLET Ivan
ivan.mestrallet@cea.fr

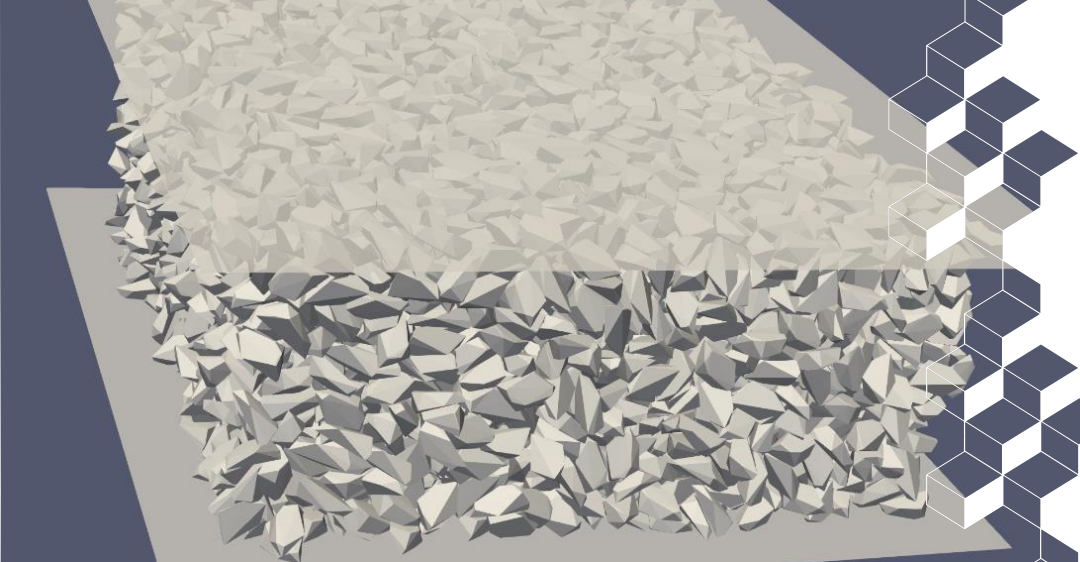


S E S C

Service d'études et de simulation du comportement des combustibles

*Studies and Simulation of Fuel
Behavior Unit*





Etude numérique de la compression d'un assemblage granulaire : effet de taille et de forme des grains

**DEC/SESC/LDOP
& DEC/SA3E/LCU**

La compression des milieux granulaires est au cœur de nombreux procédés industriels, notamment pour la fabrication des combustibles nucléaires. Nous proposons d'étudier par simulation numérique l'effet de la taille et de la forme des particules sur la microstructure du compact obtenu.

Contexte et objectifs :

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'études sur la compression de milieux granulaires.

L'objectif du stage est de réaliser des simulations numériques de compression d'assemblages granulaires afin d'étudier l'effet de taille et de forme des particules sur le compact final obtenu.

Le candidat utilisera le code de Calcul Haute Performance (HPC) ExaDEM [1], basé sur la Méthode des Eléments Discrets, dédié à la simulation des milieux granulaires.

Étapes du stage :

- Prise en main du code ExaDEM
- Construction d'une forme modèle des grains à partir de caractérisations expérimentales
- Préparation des échantillons numériques (mono-disperses puis polydisperses)
- Compaction des échantillons et analyse des résultats (compacité, nombre de coordination ...)

Lieu du stage :

Le stage est proposé au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone, situé sur le site du CEA Cadarache, à 30 minutes d'Aix-en-Provence, dans le sud-est de la France.

L'institut mène notamment des activités de R&D sur les procédés de fabrication du combustible nucléaire. Ces activités associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Pour le candidat :

Ce stage permettra au candidat de se familiariser avec un environnement de calcul haute performance appliqué à une problématique industrielle et scientifique de premier plan, à l'interface entre modélisation numérique et expérimentation.

Ce stage sera réalisé en étroite collaboration avec les équipes expérimentales.

Référence :

[1] Prat, R. et al (2025). ExaDEM: a HPC application based on exaNBody targeting scalable DEM simulations with complex particle shapes. Journal of Open Source Software, 10(106), 7484.

■ Formation souhaitée :

Ecole d'Ingénieur ou MASTER bac +5, avec dominante en modélisation, méthode et mécanique numérique, mécanique des matériaux.

■ Durée du stage :

5 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

DEM, ExaDEM, C++, Python

■ Mots clés :

Milieu granulaire, DEM, HPC, Compaction, Poudre

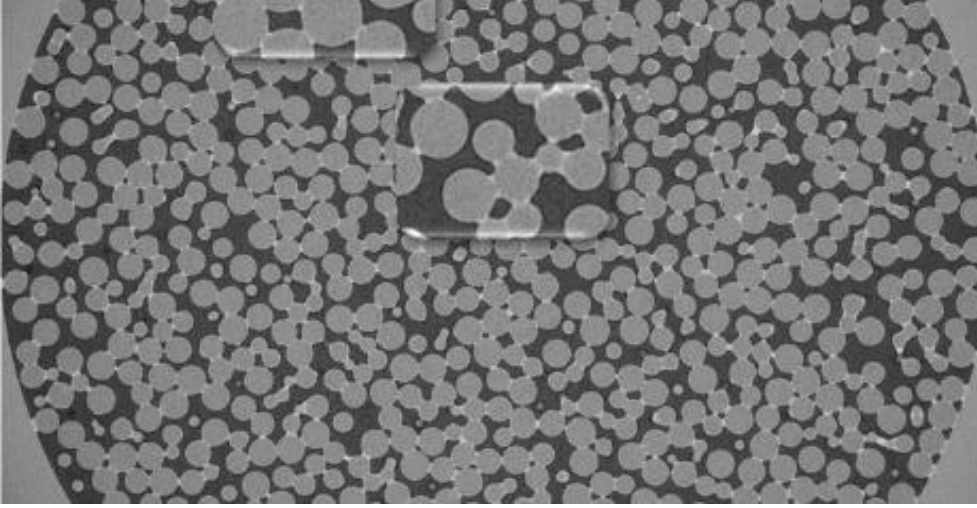
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

lhassan.amarsid@cea.fr
chloe.maurice@cea.fr
carine.ablitzer@cea.fr
Julien.moulin@cea.fr





Couplage DEM-BLM pour la simulation des milieux granulaires non saturés

**DEC/SESC/LDOP &
ISAS/DM2S/STMF/LDEL**

Les matériaux granulaires mouillés non saturés présentent une microstructure complexe, constituée de particules solides, de phases liquides et de volumes interstitiels. La compréhension de la rhéologie de ces milieux est essentielle dans diverses applications. Le but de ce stage est de réaliser un couplage du code exaDEM basé sur la méthode des éléments discrets DEM au code LBM_Saclay basé sur la méthode de Boltzmann sur réseaux (LBM) pour la modalisation de ces milieux granulaires non saturés.

Contexte et objectifs :

Ce stage s'inscrit dans le cadre des études numériques des écoulements granulaires non saturés ou mouillés.

L'objectif du stage est de réaliser un couplage de deux codes :

- le code ExaDEM [1] qui est un outil (HPC) basé sur la méthode des éléments discrets permettant la simulation de la phase granulaire.
- le code LBM_Saclay qui utilise la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) pour la modélisation des écoulements de fluide multiphasiques [2].

Étapes du stage :

- Prise en main du code ExaDEM.
- Prise en main du code LBM_Saclay.
- Définition d'une stratégie de couplage entre les deux codes et mise en œuvre de celle-ci
- Mettre en place des exemples de simulation à trois phases (solide, liquide, gaz).

Lieu du stage :

Ce stage est proposé au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone, situé sur le site du CEA Cadarache, à 30 minutes d'Aix-en-Provence, dans le sud-est de la France.

L'institut mène notamment des activités de R&D sur les procédés de fabrication du combustible nucléaire. Ces activités associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Ce stage sera réalisé en étroite collaboration avec le laboratoire STMF/LDEL du CEA/Saclay qui développe le code LBM_Saclay

Référence :

[1] Prat, R. et al (2025). ExaDEM: a HPC application based on exaNBody targeting scalable DEM simulations with complex particle shapes. Journal of Open Source Software, 10(106), 7484.

[2] W. Verdier et al, "Performance portability of lattice Boltzmann methods for two-phase flows with phase change", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 370, p. 113266, 2020

■ Formation souhaitée :

Ecole d'Ingénieur ou MASTER bac +5, avec dominante en modélisation, méthode et mécanique numérique, mécanique des matériaux et/ou des fluides, HPC.

■ Durée du stage :

5 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

DEM, LBM, C++, exaDEM, LBM_Saclay, HPC

■ Mots clés :

Milieux granulaires non saturés, couplage DEM-LBM, multi-phases

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

rapahel.prat@cea.fr

alain.cartalade@cea.fr

vincent.topin@cea.fr

lhassan.amarsid@cea.fr



Modélisation DEM du pressage d'un milieu granulaire fragmentable en condition périodique annulaire en contexte RNR

DEC/SESC/LDOP

Le procédé de fabrication des combustibles nucléaires est basé sur la métallurgie de poudres. Le pressage est une étape qui consiste à compacter et densifier la poudre (sous forme de granules) dans une presse pour obtenir des pastilles dites « crues ». L'utilisation des méthodes granulaires discrètes (DEM - Discrete Element Method) est à ce jour limitée pour simuler cette étape à l'échelle macroscopique au vu du nombre de granules et fragments à considérer. Ce stage a pour objectif d'implémenter une condition périodique annulaire dans le code granulaire ExaDEM [1] et d'évaluer sa pertinence pour atteindre l'échelle de la pastille dans le contexte d'application aux combustibles des réacteurs à neutrons rapides.

Contexte

Ce stage s'inscrit dans un projet dédié à la modélisation multiéchelle du procédé de pressage de poudres pour la fabrication des combustibles nucléaires. Si les méthodes numériques continues sont déjà capables de simuler l'étape de pressage à l'échelle macroscopique, elles dépendent encore de lois de comportement qui ne permettent pas de prendre en compte la nature discrète de la poudre et son réarrangement au cours de la densification.

La méthode des éléments discrets (DEM, Discrete Element Method) couplée au modèle de fragmentation de type Bonded Cell Method (BCM) permet de caractériser l'évolution du milieu granulaire sur des volumes élémentaires représentatifs, mais est limitée à l'échelle macroscopique au vu du grand nombre de particules et de fragments à considérer.

Afin d'envisager un passage de l'échelle granulaire à l'échelle de la pastille, il est proposé de réduire la taille du domaine à simuler en DEM en implémentant une condition périodique annulaire dans le code DEM HPC ExaDEM. Cette représentation est d'autant plus pertinente pour les réacteurs à neutrons rapides dont les pastilles de combustible sont de forme annulaire.

Objectifs

Ce stage a pour objectif d'implémenter une condition périodique dans le code HPC DEM ExaDEM [1] et de mettre en place une première simulation de pressage avec des particules fragmentables.

Étapes du stage

1. Etude bibliographique sur l'utilisation des conditions périodiques en DEM. Premiers tests sur le code de recherche Rockable. Prise en main de l'outil ExaDEM.
2. Implémentation d'une condition périodique dans ExaDEM et premiers tests sur milieux constitués de sphères monodisperses non fragmentables.
3. Mise en place d'une simulation avec particules fragmentables et évaluation du gain computationnel.

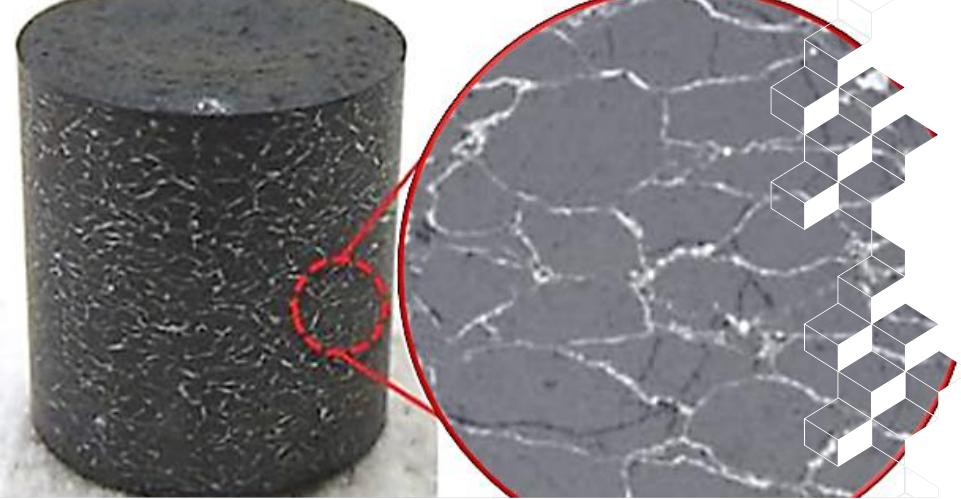
Le stage est proposé au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone, basé sur le site du CEA Cadarache à 30 minutes d'Aix en Provence dans le sud-est de la France. L'institut mène notamment des activités de R&D sur les combustibles nucléaires dans l'objectif d'accroître la sûreté et la performance des réacteurs actuels et de développer les combustibles des réacteurs du futur. Ces activités associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Référence :

[1] Prat, R. et al (2025). ExaDEM: a HPC application based on exaNBody targeting scalable DEM simulations with complex particle shapes. Journal of Open Source Software, 10(106), 7484.

- Formation souhaitée :
Ecole d'Ingénieur ou MASTER bac +5, avec dominante en modélisation, méthode et mécanique numérique, mécanique des matériaux ,HPC.
- Durée du stage :
5 à 6 mois
- Méthode/logiciel(s):
DEM, C++, ExaDEM, HPC
- Mots clés :
DEM, pressage, RNR, fragmentation, conditions périodiques, HPC
- Possibilité de thèse :
Oui
- Contact :
vincent.topin@cea.fr
lhassan.amarsid@cea.fr
raphael.prat@cea.fr





Simulation du comportement thermomécanique du combustible E-ATF CERMET microcellulaire

DEC/SESC/LECIM

Le stage proposé au sein du Laboratoire d'Etudes de Conception et Irradiations Multifilières (LECIM) vise à améliorer la compréhension du comportement thermomécanique des combustibles innovants de type CERMET microcellulaires sous irradiation par le moyen de calculs à l'échelle d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER)

Contexte

Dans les réacteurs nucléaires, le combustible est composé de pastilles de dioxyde d'uranium (UO_2) empilées dans des gaines en alliage de zirconium. Ces pastilles, en contact avec la gaine, doivent être capables de résister à des conditions extrêmes de température et de pression.

Suite à l'accident de Fukushima en 2011, la communauté internationale a travaillé au développement de concepts combustibles innovants pour améliorer la sûreté des centrales nucléaires. Aujourd'hui, les combustibles CERMET microcellulaires sont considérés parmi les concepts les plus prometteurs pour améliorer l'évacuation de la chaleur et ainsi limiter l'énergie stockée potentiellement dégageable en cas d'accident. Dans ce concept l'amélioration de la conductivité thermique est atteinte par l'ajout de métal sous la forme d'une fine couche qui enrobe les granulats d' UO_2 .

Objectifs du stage

- Améliorer la compréhension du comportement thermomécanique sous irradiation à l'aide de la simulation.

Missions principales

- Développement d'un modèle thermomécanique à l'échelle d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) de la microstructure d'un CERMET microcellulaire en prenant en compte l'anisotropie des granulats
- Etudier l'effet de l'anisotropie sur le comportement thermomécanique du système
- Etudier l'effet de la plasticité du métal sur le comportement thermomécanique du système
- Comparaison des résultats de calcul aux résultats expérimentaux obtenus au CEA et disponibles dans la littérature internationale

Apport du stage pour le(la) candidat(e)

L'étudiant(e) sera accueilli(e) sur le centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone, dans le Laboratoire d'Etudes de Conception et Irradiations Multifilières (LECIM)..

En s'appuyant sur les compétences acquises à l'école en mécanique des solides, l'étudiant(e) pourra consolider ses connaissances en thermomécanique des milieux hétérogènes et leur homogénéisation, apprendre et améliorer sa capacité à s'appuyer sur les codes de calcul pour l'étude et la compréhension de systèmes complexes.

■ Formation souhaitée :

Master II en mécanique des solides, calcul scientifique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Eléments finis (MFEM-MGIS), FFT (MEROPE, TMFFT)

■ Mots clés :

Combustible nucléaire, Calcul, Simulation, Thermique, Mécanique

■ Possibilité de thèse :

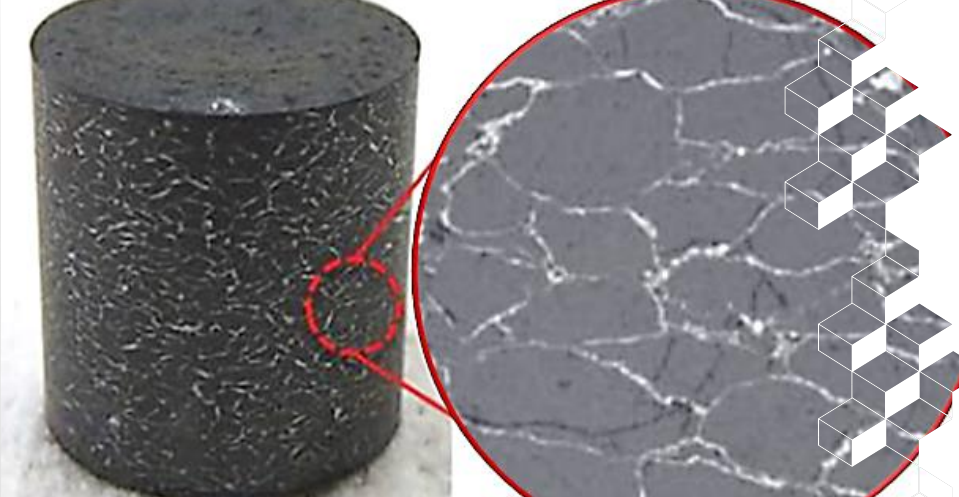
Non

■ Contact :

Luc Portelette
luc.portelette@cea.fr

Veronica D'Ambrosi
veronica.dambrosi@cea.fr





Simulation of the thermomechanical behavior of E-ATF CERMET micro-cell fuel

DEC/SESC/LECIM

The proposed internship within the Laboratory of Studies, Design and Irradiations (LECIM) aims to improve the understanding of the thermomechanical behavior of innovative CERMET micro-cell fuels under irradiation through calculations at the scale of a Representative Elementary Volume (REV)

Context

In nuclear reactors, the fuel is composed of uranium dioxide (UO_2) pellets stacked in zirconium alloy cladding. These pellets, in contact with the cladding, must be able to withstand extreme temperature and pressure conditions.

Following the Fukushima accident in 2011, the international community has worked on developing innovative fuel concepts to improve the safety of nuclear power plants. Today, micro-cell CERMET fuels are considered among the most promising concepts for improving heat dissipation and thus limiting the potentially releasable stored energy in the event of a potential accident.

In this concept, the improvement of thermal conductivity is achieved by adding metal in the form of a thin layer that coats the UO_2 aggregates.

Objectives of the Internship

Improve the understanding of thermomechanical behavior under irradiation using simulation

Main Missions

- Development of a thermomechanical model at the scale of a Representative Elementary Volume (REV) of the micro-cell CERMET microstructure, taking into account the anisotropy of the aggregates

- Study the effect of anisotropy on the thermomechanical behavior of the system
- Study the effect of metal plasticity on the thermomechanical behavior of the system
- Comparison between calculation and experimental results obtained at CEA and available in the international literature

Benefits of the Internship for the candidate

During the internship, the student will be welcomed at the Cadarache center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Multichannel Design and Irradiation Studies (LECIM).

Based on the skills already acquired in solid mechanics, the student will be able to consolidate his/her knowledge in thermomechanics of heterogeneous media and their homogenization, learn, and improve his/her ability to rely on calculation codes for the study and understanding of complex systems.

■ Formation souhaitée :

Master degree in solid mechanics and scientific calculation

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Finite elements (MFEM-MGIS), FFT (MEROPE, TMFFT)

■ Mots clés :

Nuclear fuel, Calculation, Simulation, Thermo-mechanics

■ Possibilité de thèse :

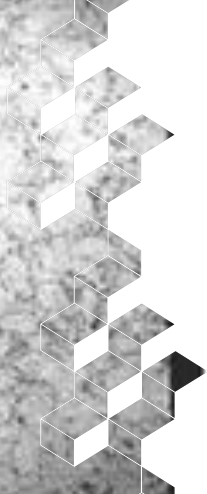
no

■ Contact :

Luc Portelette
luc.portelette@cea.fr

Veronica D'Ambrosi
veronica.dambrosi@cea.fr





Calculs préliminaires du comportement sous irradiation de combustibles MOX type RNR issus de procédés de fabrication distincts

DEC/SESC/LECIM

Dans le contexte de la fermeture du cycle et du développement des réacteurs nucléaires de 4^e génération, le projet d'irradiation MIND-FRMOX (*Microstructure INfluence on Dissolution of Irradiated Fast Reactor MOX Fuels*) vise à évaluer l'influence de deux procédés de fabrication du combustible MOX-RNR sur sa dissolution, une étape clé du retraitement. L'irradiation sera réalisée dans le réacteur HFR, aux Pays-Bas, à partir de 2027.

Cette irradiation s'inscrit dans le projet IGNITE (Innovations in Generating Nuclear fuels for Irradiation, Testing and Engineering) du programme de recherche de NRG-PALLAS. Les deux procédés de fabrication étudiés sont d'une part le procédé historique dit RNR appliqué avant 1990 et qui a permis de réaliser les charges des réacteurs Phénix et Superphénix, et d'autre part le procédé COCA (Cobroyage Cadarache), post 1990, qui a permis de réaliser la fabrication des dernières recharges de Phénix (campagne 1999).

L'expérience proposée dans le cadre de ce projet a pour objectif de comparer l'aptitude à la dissolution de 2 combustibles fabriqués selon les 2 procédés existants et irradiés dans des conditions identiques, afin d'orienter les choix technologiques des futures usines du cycle.

Ainsi, cette irradiation consiste à irradier 2 aiguilles dans des conditions identiques et de réaliser un programme d'examens destructifs (EDs). Ces EDs visent d'une part à valider les conditions d'irradiation et à caractériser le combustible après irradiation mais surtout, à réaliser 2 campagnes de dissolution en conditions identiques et représentatives. Cette démarche permettra de discriminer l'influence de la microstructure du combustible sur son aptitude à la dissolution.

L'irradiation entraîne progressivement des transformations de la microstructure du combustible, appelées phénomènes de restructuration, qui apparaissent au-delà d'un certain niveau de combustion. L'objectif est de limiter ces transformations à leurs premières manifestations, afin de conserver la mémoire du procédé de fabrication et de pouvoir étudier son influence sur le comportement du combustible, notamment lors de sa dissolution.

Ainsi, l'objectif du stage est de réaliser des calculs préliminaires afin de prédire le comportement des combustibles pendant l'irradiation.

Pour ce faire, des calculs seront réalisés à l'aide de l'outil de calcul scientifique GERMINAL, développé par le CEA et intégré à sa plateforme de simulation du comportement des combustibles nucléaires PLEIADES. GERMINAL intègre des modèles mécanistiques pour les réactions neutroniques, le relâchement des gaz de fission et la restructuration du combustible. GERMINAL s'appuie sur une vaste base de données de validation, ce qui lui confère une grande fiabilité pour les prévisions de comportement du combustible sous irradiation.

Ces calculs seront réalisés pour les deux aiguilles afin d'intégrer les différences entre les microstructures étudiées. Les données expérimentales issues de la caractérisation des pastilles après fabrication seront notamment utilisées comme données d'entrée. Les résultats feront ensuite l'objet d'une analyse critique.

L'étudiant(e) sera accueilli(e) sur le centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone, dans le Laboratoire d'Etudes de Conception et Irradiations Multifilières (LECIM). Il/Elle intégrera une équipe pluridisciplinaire réunissant des compétences complémentaires en comportement du combustible nucléaire, simulation numérique et analyse des phénomènes physiques. Cette expérience lui offrira l'occasion de développer ses compétences scientifiques et de découvrir les activités de recherche du CEA dans le domaine des combustibles nucléaires.

■ Formation souhaitée :

MASTER ou 3^{ème} année
d'Ecole d'Ingénieur
Matériaux, physico-chimie
des matériaux, nucléaire,
simulation, codes éléments
finis

■ Durée du stage :

4 mois – début en mars 2027

■ Méthode/logiciel(s):

Environnement Linux, python,
GERMINAL

■ Mots clés :

Combustible, code de calcul
de performance, irradiation

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Desagulier Marie-Margaux
marie-margaux.desagulier@cea.fr
Dumas Jean-Christophe
Jean-christophe.dumas@cea.fr



Preliminary calculations of the irradiation behavior of RNR-type MOX fuels from different manufacturing processes.

DEC/SESC/LECIM

In the context of closing the nuclear fuel cycle and developing Generation IV nuclear reactors, the MIND-FRMOX irradiation project (*Microstructure Influence on Dissolution of Irradiated Fast Reactor MOX Fuels*) aims to assess the impact of two manufacturing processes for fast reactor MOX fuel on its dissolution behaviour, a key step in reprocessing. Irradiation is scheduled to take place in the High Flux Reactor (HFR) in the Netherlands, starting in 2027.

This irradiation is part of the IGNITE (Innovations in Generating Nuclear Fuels for Irradiation, Testing, and Engineering) project within the NRG-PALLAS research program. The two fabrication processes studied are, on the one hand, the historical RNR process used prior to 1990, which was used to produce fuel assemblies for the Phénix and Superphénix reactors, and, on the other hand, the COCA (Cobroyage Cadarache) process, introduced after 1990, which was used to manufacture the final refuelings for Phénix (1999 campaign).

The experiment proposed as part of this project aims to compare the dissolution behavior of two fuels manufactured using the two existing processes and irradiated under identical conditions, in order to guide technological choices for future nuclear fuel cycle plants.

Thus, this irradiation involves irradiating two fuel rods under identical conditions and conducting a destructive examination program. These destructive examinations aim, on the one hand, to validate the irradiation conditions and characterize the fuel after irradiation, but above all, to conduct two dissolution campaigns under identical and representative conditions in order to distinguish the influence of microstructure on dissolution behavior. The objective is to achieve, after irradiation, only the initiation of restructuring in order to preserve the memory of the manufacturing process used.

Therefore, the objective of the internship is to perform preliminary calculations to predict the behavior of

fuels during irradiation.

To this end, simulations will be performed using GERMINAL, a scientific computation tool developed by the CEA and integrated into its PLEIADES platform for simulating nuclear fuel behaviour. GERMINAL incorporates mechanistic models for neutron-induced reactions, fission gas release, and fuel restructuring. It is supported by an extensive validation database, making it a highly reliable tool for predicting nuclear fuel behaviour under irradiation.

Simulations will be carried out for both fuel pins to account for the differences between the microstructures under investigation. Experimental data obtained from the characterisation of the fuel pellets after fabrication will be used as input data, among other sources. Finally, a critical analysis of the results will be conducted.

The student will be hosted at the CEA Cadarache centre, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Design Studies and Multi-Technology Irradiations (LECIM). They will join a multidisciplinary team bringing together complementary expertise in nuclear fuel behaviour, numerical simulation, and the analysis of physical phenomena. This experience will provide an opportunity to develop their scientific skills and gain insight into CEA research activities in the field of nuclear fuels.

■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent
Materials, physico-chemistry of
materials, nuclear science,
simulation, finite element codes

■ Durée du stage :

4 months – starting in March
2027

■ Méthode/logiciel(s):

Linux environment, Python,
GERMINAL

■ Mots clés :

MOX fuel, performance
calculation code, irradiation

■ Possibilité de thèse :

No

■ Contact :

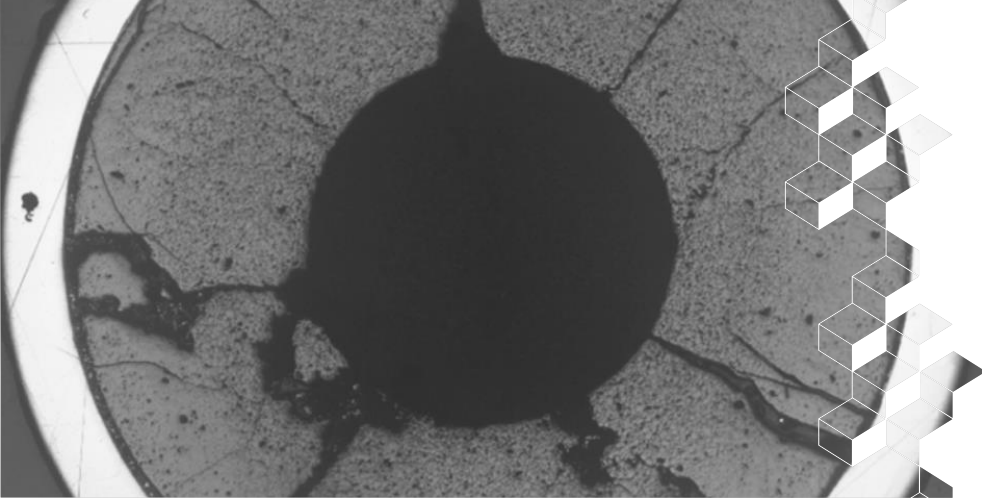
Dumas Jean-Christophe

Jean-christophe.dumas@cea.fr

Desagulier Marie-Margaux

marie-margaux.desagulier@cea.fr





Optimisation de calcul GERMINAL pour les combustibles MOX à forte teneur en Pu: l'aiguille TRABANT 2/2

DEC/SESC/LECIM

Le développement des réacteurs de quatrième génération utilisant des combustibles à oxydes mixtes (MOX) à forte teneur en plutonium offre un potentiel considérable pour une production d'énergie nucléaire plus sûre, plus efficace et plus durable. Cependant, cette avancée pose également des défis particuliers. Il est essentiel de comprendre les complexités liées aux combustibles MOX à forte teneur en Pu dans les réacteurs rapides (RNR). Dans ce contexte, plusieurs aiguilles combustibles à forte teneur en plutonium (> 30%) ont été irradiées dans le réacteur HFR de Petten dans le cadre de l'expérience TRABANT-2. L'aiguille 2/2 a notamment été étudiée, avec la réalisation d'examens post-irradiation (EPI).

L'aiguille 2/2 de l'expérience TRABANT-2 a fait l'objet d'une étude spécifique dans le cadre du projet européen PuMMA (*Plutonium Management for More Agility*). Celui-ci visait à étudier les stratégies de gestion du plutonium dans la perspective des réacteurs nucléaires de quatrième génération (GEN IV), en particulier en évaluant et en améliorant les modèles des outils de simulation scientifique dédiés aux combustibles MOX à forte teneur en plutonium. La validation de ces modèles repose notamment sur la comparaison systématique des résultats de calcul aux données expérimentales. Le projet portait sur des combustibles contenant de 40 à 45 % de plutonium, dont l'utilisation soulève des enjeux spécifiques en matière de sûreté et de performances des réacteurs, tout en offrant des perspectives pour la gestion du plutonium.

Dans ce cadre, l'aiguille TRABANT 2/2 a été étudiée, avec une teneur en plutonium de 40%. Au total 14 institutions ont participé à ce travail mettant en œuvre 8 outils de calcul. Le CEA, utilise le code GERMINAL, qui fait partie de sa plateforme de simulation des combustible PLEIADES. Cet outil a été développé par le CEA et intègre des modèles mécanistiques pour les réactions neutroniques, le relâchement des gaz de fission et la restructuration du combustible. GERMINAL s'appuie sur une vaste base de données de validation, ce qui lui confère une grande fiabilité pour les prévisions de comportement du combustible.

Les résultats obtenus lors de la comparaison entre les codes et les EPI, ont mis en évidence des écarts, tant à l'échelle globale (de l'aiguille), qu'à l'échelle locale (du combustible). L'une des hypothèses qui expliquerait ces

écarts entre les valeurs simulées et les EPI est la sous estimation de la puissance générée. En effet, l'impact de l'épuisement des écrans neutroniques pendant l'irradiation serait sous-estimé.

Ainsi, l'objectif du stage est d'optimiser les calculs réalisés avec différentes versions de GERMINAL, afin d'obtenir une meilleure cohérence avec les examens post-irradiation (EPI). Ces optimisations seront réalisées à partir des résultats et conclusions déjà obtenus lors du benchmark dans le cadre de PuMMA mais également sur les récents résultats de calculs neutroniques.

Les résultats des calculs optimisés seront comparés entre eux ainsi qu'avec les EPI. Une analyse critique de ces comparaisons, à l'échelle de l'aiguille et du combustible, sera réalisée. Ceci permettra de conclure sur la représentativité des calculs pour les combustibles MOX à forte teneur en Pu, ainsi que la sensibilité des calculs aux différents paramètres d'optimisation.

L'étudiant(e) sera accueilli(e) sur le centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire d'Etudes de Conception et Irradiations Multifilières (LECIM).

Il/Elle évoluera au sein d'une équipe multidisciplinaire associant différentes expertises en physique du combustible, modélisation et interprétation des résultats scientifiques. Ce stage lui permettra de se familiariser avec les méthodes et les outils mobilisés au CEA pour étudier le comportement des combustibles nucléaires, tout en approfondissant sa démarche d'analyse scientifique.

■ Formation souhaitée :

MASTER ou 3^{ème} année
d'Ecole d'Ingénieur
Matériaux, nucléaire,
simulation

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

GERMINAL, Python,
environnement Linux

■ Mots clés :

Combustible, MOX, EPI, code

■ Possibilité de thèse :

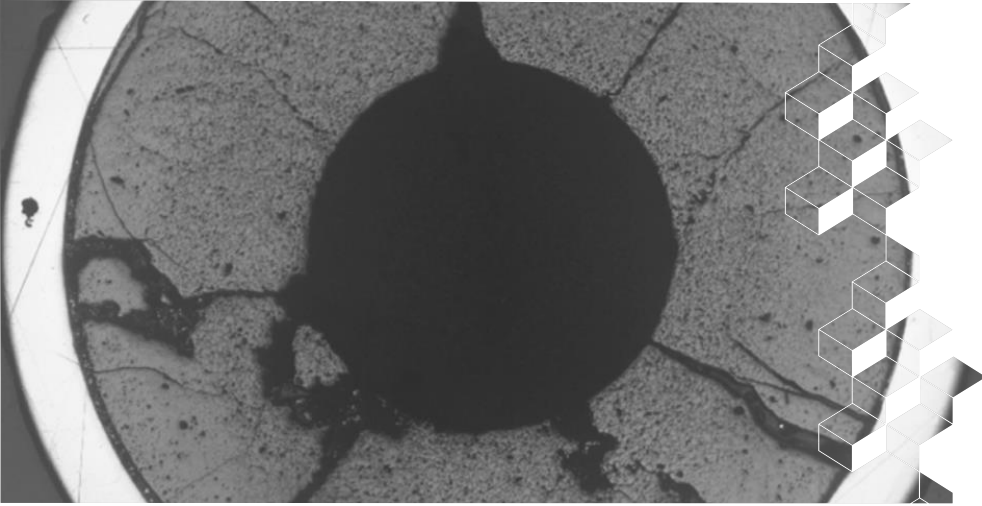
Non

■ Contact :

Desagulier Marie-Margaux
marie-margaux.desagulier@cea.fr

Deveaux Eric
eric.deveaux@cea.fr





Optimization of the GERMINAL calculation for MOX fuels with high Pu content: the TRABANT 2/2 pin

DEC/SESC/LECIM

The development of 4th generation nuclear reactors using mixed-oxide (MOX) fuel with a high plutonium content offers considerable potential for safer, more efficient, and more sustainable nuclear power production. However, this advancement also brings with it specific challenges. It is essential to understand the complexities associated with high-Pu-content MOX fuel in fast reactors (FRs). In this context, several fuel pins with high plutonium content (>30%) were irradiated in the HFR reactor at Petten as part of the TRABANT-2 experiment. In particular, fuel pin 2/2 was studied, and a post-irradiation examination (PIE) was conducted.

This pin was specifically studied as part of the European PuMMA project (Plutonium Management for More Agility). The aim of this project was to redefine plutonium management for Generation IV nuclear reactors. More specifically, it sought to evaluate and improve the performance calculation models for high-plutonium-content MOX fuels. The results of the calculations are systematically compared with experimental data. This project focused on fuels with a plutonium content of 40 to 45 %, which presents unique challenges and opportunities in terms of reactor safety and performance.

In this context, the TRABANT 2/2 pin was studied, with a plutonium content of 40%. A total of 14 institutions participated in this work, representing 8 computational codes. The CEA uses the GERMINAL code, which is part of the PLEIADES platform. This code was developed by the CEA and incorporates mechanistic models for neutron reactions, fission gas release, and fuel restructuring. GERMINAL is supported by an extensive validation database, which ensures high reliability in predicting fuel behavior.

The results obtained from the comparison between the codes and the PIE revealed discrepancies, both on a global scale (at the pin level) and on a local scale (at the fuel level). One possible explanation for these discrepancies between the simulated values and the PIE is an underestimation of the power generated. Indeed, the impact of the depletion of the Cd shields during irradiation may be underestimated.

Thus, the goal of the internship is to optimize the calculations performed using different versions of GERMINAL in order to achieve improved consistency with the PIE. These optimizations will be based on the results and conclusions already obtained during the benchmark conducted as part of the PuMMA project, as well as on recent results from neutron calculations.

The results of the optimized calculations will be compared with the PIE data. A critical analysis of these comparisons, at the pin and fuel levels, will be conducted. This will allow us to draw conclusions regarding the representativeness of the calculations for high-Pu-content MOX fuels, as well as the sensitivity of the calculations to various optimization parameters.

The student will be hosted at the CEA Cadarache centre, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Design Studies and Multi-Technology Irradiations (LECIM).

They will work within a multidisciplinary team combining expertise in nuclear fuel physics, modelling, and the interpretation of scientific results. This internship will provide an opportunity to become familiar with the methods and tools used at the CEA to investigate nuclear fuel behaviour, while further developing their scientific analysis skills.

■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent
Materials, Nuclear, simulation

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

GERMINAL, Python, Linux
environment

■ Mots clés :

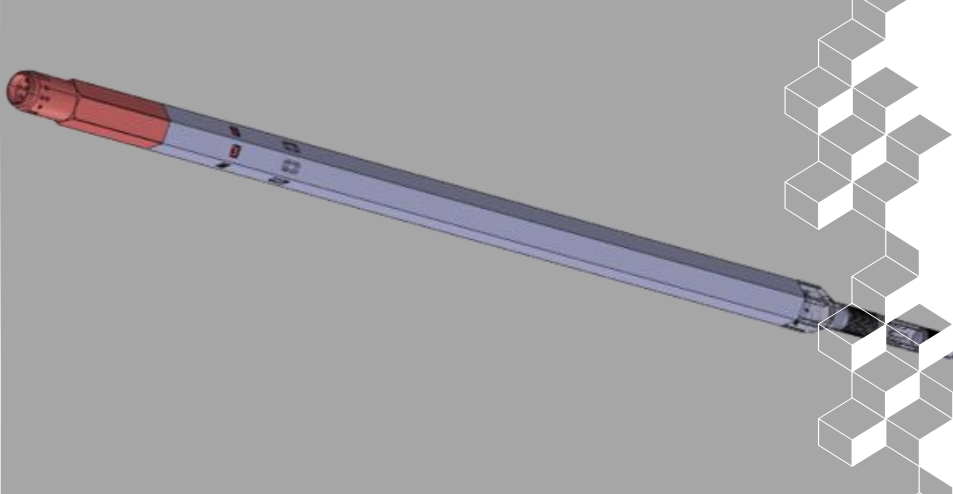
Fuel, MOX, PIE, code

■ Possibilité de thèse :

No

■ Contact :

Deveaux Eric
eric.deveaux@cea.fr
Desagulier Marie-Margaux
marie-margaux.desagulier@cea.fr



Préconception thermomécanique des assemblages combustibles RNR-Na dans la plateforme POSTER

DEC / SESC / LECIM

Dans le cadre du développement des réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), le CEA réalise la conception et le dimensionnement du cœur de ces réacteurs, qui est constitué d'éléments combustibles regroupés sous forme d'assemblages.

Contexte :

Le CEA possède une expérience significative dans la conception des éléments combustibles des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), acquise grâce aux différents réacteurs de ce type qui ont été construits et exploités (Rapsodie, Phénix, SuperPhénix), ainsi que dans le cadre de projets tel qu'ASTRID.

Les RNR constituent une étape indispensable pour parvenir à une fermeture complète du cycle du combustible. La stratégie française prévoit un déploiement des RNR sur la 2^{ème} moitié du siècle pour parvenir à la fermeture du cycle à la fin du siècle.

Dans ce cadre, le CEA développe la plateforme POSTER (Préconception à l'aide d'Outils Simplifiés Transverses pour l'Etude des RNR-Na), qui est une plateforme de préconception de cœur RNR-Na permettant l'exploration du domaine des possibles en terme de conception. Cet outil est codéveloppé par plusieurs unités du CEA en fonction de leur champ d'expertise (neutronique, thermomécanique, thermohydraulique, sûreté).

Le Laboratoire d'Etudes de Conception et d'Irradiations Multifilières (LECIM) a en charge la conception et le dimensionnement des éléments combustibles des futurs réacteurs RNR-Na, ainsi que le développement de la partie thermomécanique et combustible de POSTER.

Objectifs :

L'outil inclut les caractéristiques géométriques et matériaux des assemblages combustibles ainsi que les principaux phénomènes physiques auxquels ils sont soumis : irradiation, thermique et mécanique.

L'objectif principal du stage est de contribuer au développement de la brique thermomécanique et combustible de la plateforme POSTER.

Il sera notamment demandé d'intégrer un module permettant de vérifier l'interaction du faisceau d'aiguilles pendant l'irradiation. Aussi, la mise en place d'une relation entre la thermique du faisceau d'aiguilles en fonction de l'isotopie du combustible sera nécessaire.

Il sera par ailleurs demandé de rendre l'outil le plus flexible possible afin de pouvoir s'adapter à des géométries variées et innovantes.

L'étudiant(e) sera accueilli(e) au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire d'Études de Conception et Irradiations Multifilières (LECIM).

Au cours de son stage, il/elle bénéficiera de l'expertise et du savoir-faire du LECIM, et pourra échanger avec des spécialistes du Département d'Étude des Réacteurs (DER), afin de profiter de compétences complémentaires sur les différentes thématiques abordées.

Ce stage lui offrira l'opportunité de découvrir les activités de recherche du CEA dans le domaine des réacteurs nucléaires, de se familiariser avec des outils de préconception et de développer ses compétences en modélisation et en conception des cœurs de réacteurs.

■ Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3^{ème} année
d'école d'ingénieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Conception,
Dimensionnement,
Mécanique, Thermique,
Python

■ Mots clés :

Conception, assemblage,
aiguille, combustible, RNR-
Na, thermomécanique,
POSTER

■ Possibilité de thèse :

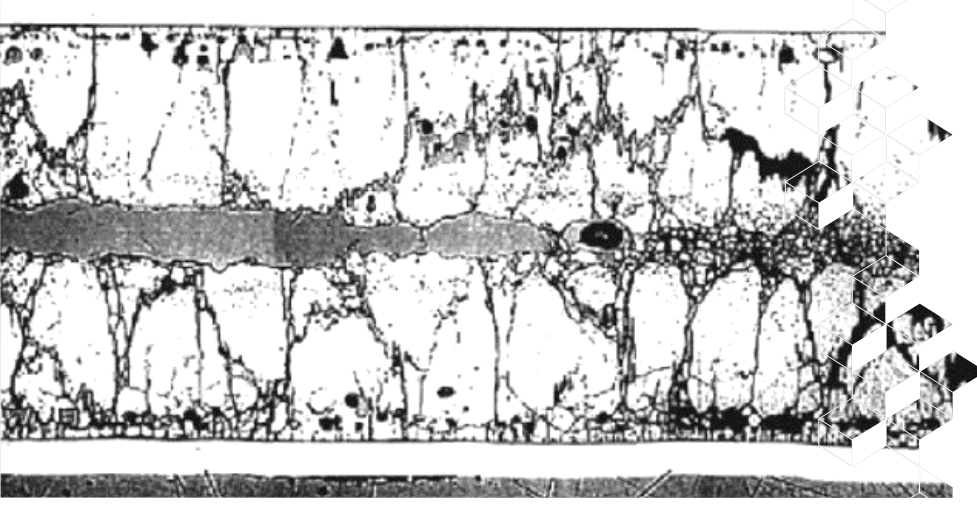
Non

■ Contact :

DUPONT Vincent
vincent.dupont@cea.fr

BLANC Victor
victor.blanc@cea.fr





Modélisation hydrodynamique de l'éjection de combustible fondu

DEC/SESC/LEVA

Ce stage s'inscrit dans les actions de développement des outils de calcul scientifique développés au CEA afin de simuler le comportement des combustibles nucléaires en conditions incidentelles ou accidentelles.

Afin de réaliser des études et expertises, le CEA développe des Outils de Calcul Scientifique (OCS) du comportement des combustibles nucléaires à différentes échelles, dans diverses situations de fonctionnement et pour différentes filières de réacteurs. Ces outils de calcul multiphysiques couplent des modèles traitant des évolutions thermomécaniques, neutroniques et physico-chimiques du matériau combustible et de sa gaine afin de calculer des grandeurs utiles pour la compréhension d'expériences ou le dimensionnement d'objets innovants.

Dans certaines situations incidentelles ou accidentelles hypothétiques, caractérisées par une augmentation transitoire de la puissance du réacteur, la partie centrale de la pastille combustible pourrait atteindre des températures suffisamment élevées pour entrer rapidement en phase liquide. Selon les conditions locales, la pression de ce combustible fondu peut-être élevée (induisant des contraintes sur les solides) et le liquide est susceptible d'être éjecté vers des cavités plus froides de l'élément combustible.

L'objectif principal du stage est de formuler un modèle décrivant le comportement du combustible fondu en transitoires rapides en une dimension. De multiples compétences seront acquises par le stagiaire au cours de ce travail :

- La simulation des transitoires rapides en réacteurs à neutrons rapide a l'aide d'un outil de simulation thermomécanique du combustible, ce qui nécessite une bonne compréhension des

phénomènes couplés en jeu,

- La modélisation hydrodynamique du combustible fondu, via un état de l'art des approches mises en œuvre dans les codes existants dédiés aux accidents graves, notamment,
- L'implémentation numérique de modèles de ce type a des fins exploratoires et la mise en œuvre sur des cas tests d'expériences ayant conduit à l'éjection de combustible fondu.

La réalisation d'un état de l'art et la réalisation d'un prototype permettront de formuler des recommandations pour une modélisation hydrodynamique couplée dans les outils de calcul scientifique de la plateforme de simulation des combustibles PLEIADES développée au CEA.

L'étudiant(e) sera accueilli(e) sur le centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire d'Expertises et de Validation des Applications combustibles multifilières (LEVA). Il/Elle intégrera une équipe pluridisciplinaire réunissant des compétences en comportement du combustible nucléaire, simulation numérique et analyse des phénomènes physiques. Cette expérience lui offrira l'occasion de développer ses compétences scientifiques et de découvrir les activités de recherche du CEA dans le domaine des combustibles nucléaires.

■ Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieurs : spécialités mécanique des fluides, simulation numérique, matériaux

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python

■ Mots clés :

Mécanique des fluides, combustible, simulation

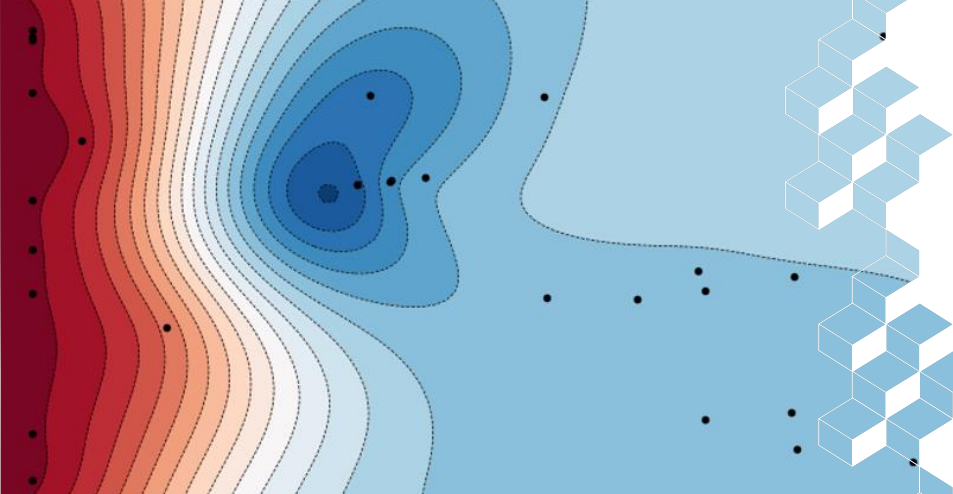
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

BARANI Tommaso
tommaso.barani@cea.fr





Méthodologie d'analyse des incertitudes pour la thermomécanique des aiguilles de réacteurs à neutrons rapides

DEC/SESC/LEVA

Ce stage contribuera à la qualification des outils de calcul scientifique développés au CEA afin de simuler le comportement des combustibles nucléaires sous irradiation et contribuera à renforcer leur fiabilité et leur capacité prédictive.

Afin de réaliser des études et expertises, le CEA développe des Outils de Calcul Scientifique (OCS) du comportement des combustibles nucléaires à différentes échelles, dans diverses situations de fonctionnement et pour différentes filières de réacteurs. Ces outils de calcul multiphysiques couplent des modèles traitant des évolutions thermomécaniques, neutroniques et physico-chimiques du matériau combustible et de sa gaine afin de calculer des grandeurs utiles pour la compréhension d'expériences ou le dimensionnement d'objets innovants.

Ces codes utilisent en entrée des grandeurs affectées par différentes sources d'incertitude. Les conditions d'irradiation et les paramètres géométriques sont notamment soumis à des incertitudes aléatoires, tandis que les propriétés thermophysiques des matériaux sont affectées par des incertitudes dites « épistémiques », liées aux limites des connaissances disponibles.

L'objectif du stage est de mettre au point une méthodologie pour prendre en compte la propagation des incertitudes dans le calcul et réaliser une analyse de sensibilité aux paramètres des modèles. Le/la stagiaire appliquera cette méthode à une aiguille combustible de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), afin de mieux comprendre l'influence des différents paramètres sur le comportement simulé du combustible..

De multiples compétences seront acquises par le stagiaire au cours de ce travail :

- La modélisation des incertitudes, ce qui requiert une connaissance fine des combustibles MOX, de leur fabrication, et de leur modélisation physique,

- La construction et la validation de métamodèles du code de calcul (« surrogate models ») par différentes méthodes de machine learning, compte-tenu du coût de calcul important des simulations,
- Diverses méthodes statistiques liées au calcul d'indices de sensibilité globaux, et à la propagation d'incertitudes.

Cette méthodologie devra être largement applicable pour contribuer aux processus de qualification des outils de simulation pour les études de sûreté nucléaire.

Le stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire d'Expertises et de Validation des Applications combustibles multifilières (LEVA).

Le/la stagiaire bénéficiera d'un environnement scientifique stimulant, au contact de spécialistes du combustible nucléaire et de la simulation numérique. Il/Elle pourra ainsi découvrir les approches mises en œuvre au CEA pour analyser et modéliser les phénomènes physiques liés au comportement des combustibles sous irradiation, tout en développant ses capacités d'analyse et sa compréhension des problématiques de recherche dans le domaine nucléaire.

■ Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieurs : spécialités math. appliquées, simulation numérique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Méthodes statistiques, URANIE

■ Mots clés :

Incertitudes, combustible, simulation thermomécanique

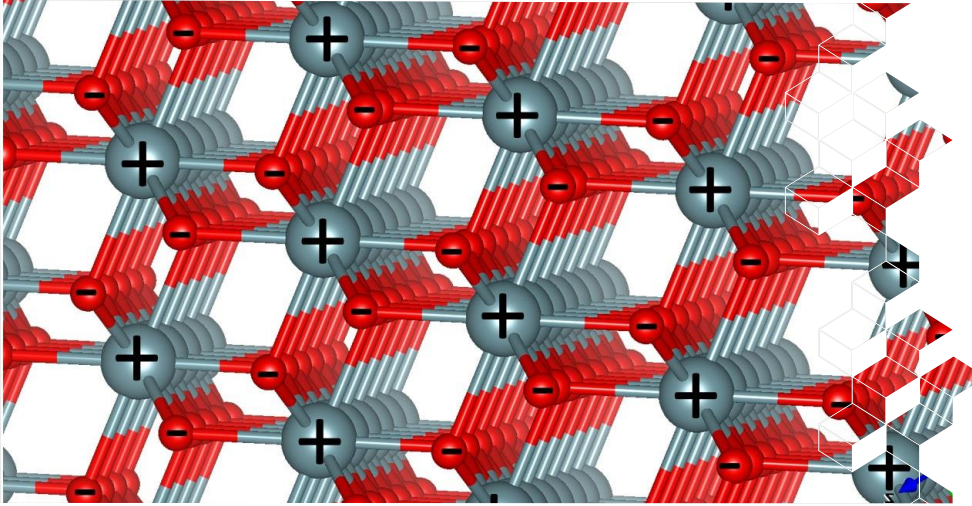
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

BERNACHY-BARBE Fabien
fabien.bernachy-barbe@cea.fr





Améliorer la modélisation du combustible UO_2 grâce à l'apprentissage automatique des interactions diélectriques à longue portée

DEC/SESC/LM2C

Le dioxyde d'uranium (UO_2), principal combustible des réacteurs nucléaires, nécessite une modélisation précise pour garantir performance et sûreté. Ses propriétés diélectriques, liées à sa nature polaire, sont encore insuffisamment prises en compte dans les simulations actuelles. Ce stage propose de remédier à cette limitation au moyen de l'apprentissage automatique, en développant des modèles qui capturent ces interactions de manière explicite et en confrontant les propriétés diélectriques prédites aux mesures expérimentales.

Contexte

Le dioxyde d'uranium est le principal combustible utilisé dans les réacteurs nucléaires, et nécessite donc une modélisation précise de ses propriétés pour répondre aux exigences des applications industrielles. Les progrès récents des potentiels interatomiques par apprentissage automatique (MLIPs) ont révolutionné la simulation de l' UO_2 , permettant des simulations à grande échelle avec une précision proche de celle des calculs ab initio [1]. Cependant, la plupart des MLIPs existants reposent sur des interactions à courte portée, supposant que les interactions atomiques au-delà d'un certain rayon de coupure sont négligeables.

Pour les matériaux polaires comme l' UO_2 , cette approche néglige les importantes interactions diélectriques à longue portée, qui sont essentielles pour une description précise du comportement du matériau.

Récemment, une nouvelle classe de MLIPs a émergé, qui apprend directement ces interactions diélectriques à longue portée via l'énergie [2,3]. Ces modèles promettent non seulement une précision accrue dans les prédictions d'énergie, mais donnent aussi accès à des propriétés diélectriques jusqu'alors inaccessibles, telles que les spectres infrarouges et la redistribution des charges.

Objectif du stage

Au cours de ce stage, le ou la candidat(e) contribuera à la modélisation au premier principe de l' UO_2 en développant et en entraînant des MLIPs incorporant explicitement les interactions diélectriques à longue portée. Le projet comprendra :

- Développement de modèles : entraîner des MLIPs de pointe pour l' UO_2 , en se concentrant sur la capture des effets diélectriques à longue portée.

- Comparaison de performances (benchmarking) : évaluer les performances de ces nouveaux modèles par rapport aux MLIPs existants pour l' UO_2 , afin de quantifier les améliorations apportées par l'inclusion des interactions diélectriques.
- Prédiction de propriétés : utiliser les modèles entraînés pour calculer les propriétés diélectriques de l' UO_2 et valider les résultats par rapport aux mesures expérimentales [4].

Le stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C).

Le/la stagiaire évoluera dans un environnement de recherche stimulant, au contact de spécialistes de la physique des matériaux et de la simulation numérique. Il/Elle découvrira l'apport de l'apprentissage automatique à la modélisation des propriétés du combustible nucléaire et développera ses compétences en modélisation et en analyse scientifique.

[1] E. T. Dubois et al, Phys. Rev. Mater. 8, 025402 (2024) ;

[2] D. S. King et al, Nat. Commun. 16 (1), 8763 (2025) ;

[3] P. Zhong et al, npj Comput. Mater. 11 (1), 384 (2025) ;

[4] J. D. Axe et G. D. Pettit, Phys. Rev. 151, 676 (1966)

■ Formation souhaitée :

Master, 2^{ème} année

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire / LAMMPS ASE

Machine-learning / Pytorch

■ Mots clés :

Combustible nucléaire

Potentiels interatomiques basés sur le machine learning

Propriétés diélectriques

■ Possibilité de thèse :

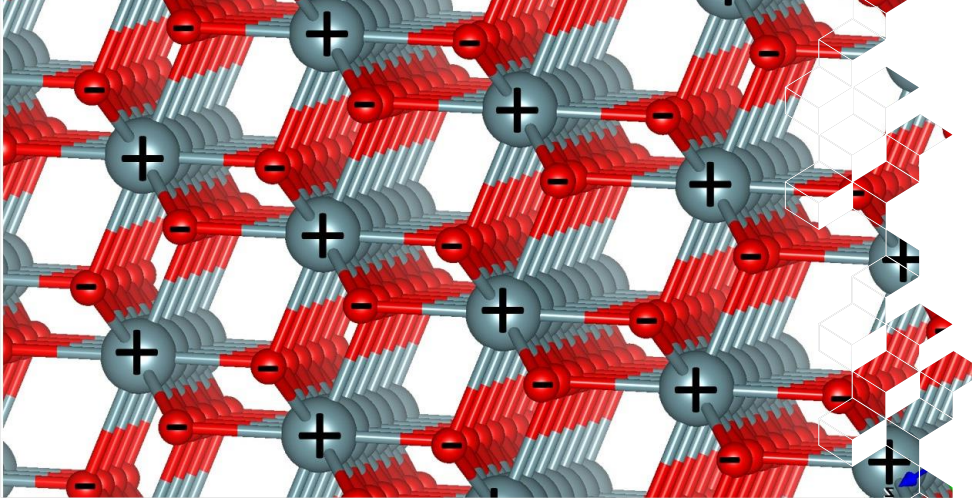
Oui

■ Contact :

CASTELLANO Aloïs

alois.castellano@cea.fr





Advancing the modeling of UO₂ fuel through the machine-learning of long range dielectric interactions

DEC/SESC/LM2C

Uranium dioxide, the primary fuel used in nuclear reactors worldwide, requires accurate modeling to ensure performance and safety. Because UO₂ is a polar material, its dielectric properties are essential to describe its physical behavior accurately, yet most simulation approaches today neglect or approximate the long-range interactions that govern them.

This internship proposes to address this limitation using machine learning, by developing models that capture these interactions explicitly and validating the predicted dielectric properties against experimental measurements.

Context

Uranium dioxide is the primary fuel used in nuclear reactors, making its accurate modeling crucial for industrial applications.

Recent advances in machine-learning interatomic potentials (MLIPs) have revolutionized the simulation of UO₂, enabling large-scale simulation with near ab-initio accuracy [1]. However, most existing MLIPs rely on short-range interactions, assuming negligible atomic interactions beyond a certain cutoff radius.

For polar materials like UO₂, this approach overlooks the significant long-range dielectric interactions, which are essential for an accurate description of the material's behavior. Recently, a new class of MLIPs have emerged that learns directly these long-range dielectric interactions through the energy [2,3].

These models not only promise improved accuracy in energy predictions but also unlock access to previously inaccessible dielectric properties, such as infrared spectra and charge redistribution.

Objective of the internship

In this internship, the candidate will contribute to the first-principles modeling of UO₂ by developing and training MLIPs that explicitly incorporate long-range dielectric interactions.

The project will involve :

- **Model development:** Training state-of-the-art MLIPs for UO₂, with a focus on capturing long-range dielectric effects.
- **Benchmarking:** Comparing the performance of these new models against existing MLIPs for UO₂ to quantify the improvements brought by the inclusion of dielectric interactions
- **Property prediction:** Using the trained models to compute dielectric properties of UO₂ and validating the results against experimental measurements [4]

The internship will take place at the CEA Cadarache site, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C).

The intern will work in a stimulating research environment alongside specialists in materials physics and numerical simulation. They will explore how machine learning can contribute to modeling nuclear fuel properties and develop their skills in modeling and scientific analysis.

- [1] E. T. Dubois et al, Phys. Rev. Mater. 8, 025402 (2024)
- [2] D. S. King et al, Nat. Commun. 16 (1), 8763 (2025)
- [3] P. Zhong et al, npj Comput. Mater. 11 (1), 384 (2025)
- [4] J. D. Axe and G. D. Pettit, Phys. Rev. 151, 676 (1966)

■ Formation souhaitée :

Master degree, 2nd year

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Molecular dynamics / LAMMPS
ASE

Machine-learning / pytorch

■ Mots clés :

Nuclear fuel Machine-learning
interatomic potential

Dielectric properties

■ Possibilité de thèse :

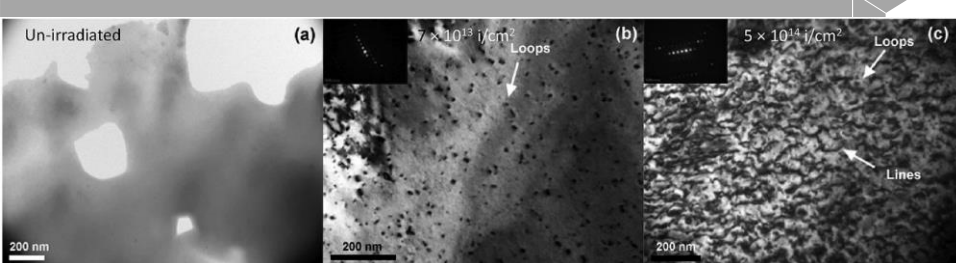
yes

■ Contact :

CASTELLANO aloïs

alois.castellano@cea.fr





De l'Angström au micron: un modèle d'évolution microstructurale du combustible nucléaire dont les paramètres sont calculés à l'échelle atomique

DEC/SESC/LM2C

Réseau de boucles et lignes de dislocation apparaissant en cours d'irradiation dans l' UO_2 . L'objectif est de prédire la concentration de ces défauts de microstructure (Onofri et al 2016)

Le relâchement des gaz de fission au cours de l'irradiation constitue un phénomène important pour l'évaluation du comportement du combustible nucléaire au regard des critères de sûreté. L'objectif du stage est de valider, à partir de données expérimentales acquises à différentes échelles, un modèle décrivant le comportement des gaz de fission en lien avec l'endommagement du combustible sous irradiation.

Lors de l'irradiation en réacteur, la microstructure du combustible nucléaire (oxyde d'uranium) évolue sous l'effet des cascades de déplacements atomiques induites par la fission nucléaire. Ces déplacements génèrent des défauts d'irradiation, notamment des lacunes et des interstitiels, dont l'agrégation conduit progressivement à la formation de cavités et de boucles de dislocation.

Ces défauts étendus influencent notamment le volume du matériau, son fluage et sa capacité de rétention vis-à-vis des gaz de fission. Le modèle physique du phénomène est la dynamique d'amas : jeu d'équations cinétiques représentant les réactions chimiques d'agrégation des défauts sous l'effet de leur diffusion dans le matériau.

La plupart des paramètres du modèle sont issus de calculs atomistiques (énergies de formation et de migration des défauts, dommage d'irradiation). Cependant une partie d'entre eux n'a pas été calculée et sont pratiquement impossibles à mesurer directement. La démarche proposée pour ce stage est double :

1. Identifier et calibrer les paramètres manquants du modèle en confrontant ses prédictions aux résultats d'expériences déjà disponibles au laboratoire, portant sur l'évolution de la microstructure du combustible. Ces données incluent notamment les caractérisations par microscopie électronique en transmission des dislocations et des cavités (taille et concentration). Des techniques innovantes seront mises en œuvre pour mener à bien cette démarche de calibration :
 - analyse de sensibilité pour déterminer quels paramètres ont un impact sur les grandeurs mesurées
 - optimisation (algorithmes génétiques) pour ajuster au mieux ces paramètres. On utilisera la plateforme URANIE™ développée au CEA pour l'analyse statistique des données.
 - Monte Carlo cinétique pour simuler le dommage d'irradiation
2. Valider ce modèle ainsi paramétré en comparant ses résultats à des mesures issues d'autres expériences.

Le modèle sera ensuite appliqué à de nouvelles situations, comme l'irradiation en pile du combustible dans le but de prédire le relâchement des gaz de fission par exemple ou la densité de boucles et lignes de dislocation.

Ce sujet de modélisation comporte des tâches variées :

- l'interprétation d'expériences
- des développements informatiques simples de scripts d'optimisation pour URANIE
- la simulation de situations expérimentales ou industrielles

Ce travail offre une position centrale et un point de vue synthétique sur la physique du combustible en irradiation. Il vous permettra de contribuer au développement de la physique numérique appliquée à une démarche multiéchelle de modélisation. Vous découvrirez ainsi en quoi des outils de simulation basés sur les données microscopiques les plus fondamentales obtenues par le calcul atomistique permettent de traiter et expliquer des situations pratiques.

Le stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C).

Pour aller plus loin :

R. Skorek, [Étude Par Dynamique d'Amas de l'influence Des Défauts d'irradiation Sur La Migration Des Gaz de Fission Dans Le Dioxyde d'uranium](#), PhD Thesis, Univ. Aix-Marseille, 2013.

Bertolus et al. (2015). Linking atomic and mesoscopic scales for the modelling of the transport properties of uranium dioxide under irradiation. [Journal of Nuclear Materials](#), 462, 475-495.

Onofri et al. (2016). Evolution of extended defects in polycrystalline Au-irradiated UO_2 using in situ TEM: Temperature and fluence effects. [Journal of Nuclear Materials](#) 482, 105-13.

■ Formation souhaitée :

MASTER 2 ou équivalent

Physique du solide, surfaces et interfaces

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Utilisation/amélioration de codes de simulation, codage simple de mécanismes physiques

■ Mots clés :

Physique numérique, cinétique chimique, irradiation des matériaux

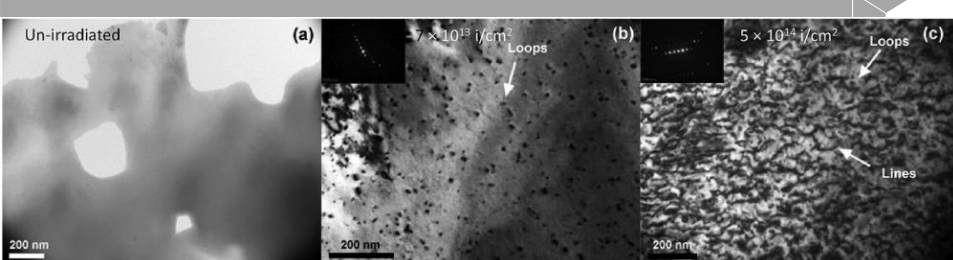
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

MAILLARD Serge
serge.maillard@cea.fr





From Angstrom to
micron: building a
model for the fuel in-
pile evolution based on
data calculated at the
atom level

DEC/SESC/LM2C

Network of dislocation loops and lines formed during irradiation of UO_2 . The objective is to predict the concentration of these microstructural defects (Onofri et al., 2016).

Fission induces microstructural changes in nuclear fuel and the production of gases that can affect fuel performance and safety. This project aims to develop and validate a model describing fuel microstructure evolution under irradiation, using experimental data and microscopic observations.

During reactor irradiation, fission events progressively modify the microstructure of nuclear fuel (uranium dioxide). The displacement of atoms creates defects, such as vacancies and interstitials, which can gradually cluster and lead to the formation of cavities and dislocation loops. These extended defects influence the volume of the material, its creep and its retention of fission gases.

The physical model of the phenomenon is cluster dynamics: a set of kinetic equations representing the chemical reactions of defect aggregation by diffusion in the material.

Most of the model parameters are derived from atomistic calculations (defect formation and migration energies, irradiation damage). However, some of them have not been calculated and are practically impossible to measure directly. The approach proposed for this internship is twofold:

a. Fitting the missing parameters using the model to simulate the results of experiments (already available in the laboratory) in which the microstructure is affected, such as transmission electron microscopy characterisation of dislocations and voids (size, concentration). Innovative techniques will be used:

- Sensitivity analysis to determine which parameters affect the measured values
- Optimisation (genetic algorithms) to fine-tune these parameters. The URANIE™ platform developed by the CEA will be used for the statistical analysis of the data.
- Kinetic Monte Carlo for the damage simulation

b. Validate this fitted model by comparing its results with measurements from other experiments. The model will then be applied to new situations, such as irradiation of fuel material to predict fission gas release, or the density of loops and dislocation lines.

This modelling project involves a variety of tasks:

- Interpretation of experiments
- simple computational development of optimisation scripts for URANIE
- simulation of experimental or industrial situations

The internship will take place at the CEA Cadarache site, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C).

The intern will join a multidisciplinary research team with expertise in nuclear fuel behavior, atomistic simulations, and multiscale modeling. This internship offers the opportunity to contribute to the development of numerical methods for multiscale modeling while gaining a broad understanding of the physical processes involved. It also provides insight into how atomistic simulations can help address complex practical challenges in nuclear fuel research.

R. Skorek, Étude Par Dynamique of uranium dioxide undd'Amas de l'influence Des Défauts d'irradiation Sur La Migration Des Gaz de Fission Dans Le Dioxyde d'uranium, PhD Thesis, Univ. Aix-Marseille, 2013.

Bertolus et al. (2015). Linking atomic and mesoscopic scales for the modelling of the transport properties er irradiation. Journal of Nuclear Materials, 462, 475–495.

Onofri et al. (2016). Evolution of extended defects in polycrystalline Au-irradiated UO_2 using in situ TEM: Temperature and fluence effects. Journal of Nuclear Materials 482, 105-13.

■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent in materials physics, modelling or numerical physics

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Using/improving simulation codes, simple coding of physical mechanisms

■ Mots clés :

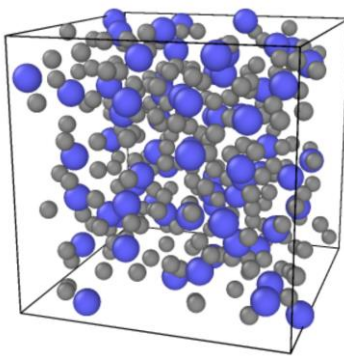
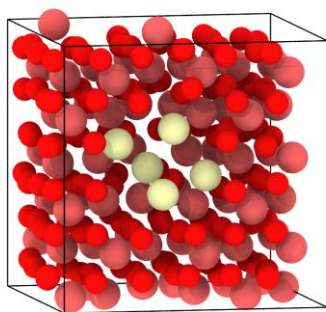
Numerical Physics
Chemical Kinetics
Materials irradiation

■ Possibilité de thèse :

No

■ Contact :

MAILLARD Serge
serge.maillard@cea.fr



Evaluation de potentiels interatomiques machine-learning 'universels' pour la simulation de combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C

Le dioxyde d'uranium (UO_2) et les alliages d'uranium tels que (U,Si) et (U,Mo) sont des matériaux critiques pour les applications de combustible nucléaire. Ces matériaux fonctionnent dans des conditions extrêmes (températures élevées, irradiation intense, contraintes mécaniques), qui induisent une évolution microstructurale complexe. Comprendre et prédire leur comportement est essentiel pour la sûreté nucléaire et l'optimisation des performances combustible. Les simulations atomistiques traditionnelles reposent sur des potentiels interatomiques qui peuvent manquer de précision ou de transférabilité pour ces systèmes complexes. Dans ce contexte, les potentiels obtenus par méthodes d'apprentissage automatique (ML) offrent une alternative prometteuse. Ces potentiels, entraînés sur des données de haute fidélité, peuvent capturer la complexité des combustibles nucléaires avec une précision et une généralité améliorées.

Objectifs: L'objectif de ce stage est d'évaluer la faisabilité et les performances de l'utilisation directe et/ou de l'affinage (*fine-tuning*) du modèle GRACE pour des simulations atomistiques de matériaux nucléaires, en particulier UO_2 , (U,Si) et (U,Mo). Vous étudierez l'applicabilité du modèle GRACE à ces matériaux, en évaluant sa capacité à reproduire des propriétés physiques clés (par exemple, constantes élastiques, énergies de formation de défauts, conductivité thermique). Ensuite, vous étudierez la possibilité d'affiner le modèle pour les matériaux cibles, en incorporant des données d'entraînement supplémentaires ou en le ré-entraînant (processus de *fine-tuning*). Les données produites seront systématiquement comparées aux résultats de modèles existants et aux données expérimentales afin de valider leurs performances.

Étapes: (1) Bibliographie et familiarisation avec les outils de calcul (environnement Linux et calculateurs haute performance, LAMMPS, code ABINIT). (2) Compréhension du modèle GRACE : étude de l'architecture, des données d'entraînement et des capacités du modèle GRACE, ainsi que de son implémentation pour les simulations de dynamique moléculaire (DM). (3) Simulation et test des modèles existants pour UO_2 , (U,Si) et (U,Mo), par une analyse des résultats pour des propriétés clés (par exemple, énergies de défauts, conductivité

thermique, propriétés élastiques) et comparaison avec les données expérimentales ou les résultats de potentiels empiriques. (4) Affinage (si applicable) : ajuster le modèle GRACE pour améliorer sa précision pour les matériaux cibles, en utilisant des données *ab initio* supplémentaires ou des entrées expérimentales. (5) Collaboration et valorisation : travailler en étroite collaboration avec l'équipe de recherche pour interpréter les résultats obtenus, et préparer rapports et présentations.

Contexte et collaborations: Vous serez accueilli dans un laboratoire de recherche dynamique, spécialisé dans la simulation multiéchelle des combustibles nucléaires, au centre de recherche de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone. Vous collaborerez avec des chercheurs et des doctorants du laboratoire, experts en simulations atomistiques et en matériaux nucléaires. Des collaborations externes avec d'autres Services du CEA ou d'autres équipes de recherche en vue d'un soutien technique et de conseils sur son application, sont envisagées. Ce stage offre une opportunité unique de contribuer à des recherches de pointe à l'intersection de l'apprentissage automatique, de la science des matériaux et de l'ingénierie nucléaire, avec des applications potentielles pour améliorer les performances et la sûreté des combustibles nucléaires

Formation souhaitée :

Master 2 en physique de l'état solide, ingénierie nucléaire.

Durée du stage : 6 mois

Méthode logiciels :

LAMMPS (molecular dynamics), VASP/ABINIT (*ab initio* methods), AbTEM (TEM)

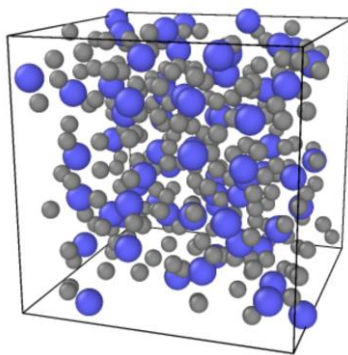
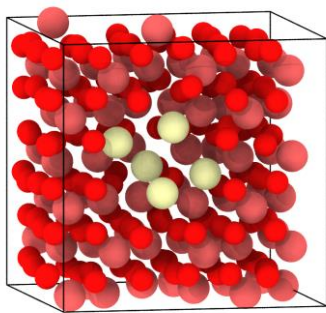
Mots clés :

Combustibles nucléaires, simulations atomistiques.

Possibilité de thèse : Oui

Contact :

Julien.tranchida@cea.fr



Probing Foundational Machine-Learning Interatomic Potentials for Nuclear Fuel Material Simulations

DEC/SESC/LM2C

Sintered pellets of uranium dioxide (UO_2) and uranium alloys such as (U,Si) and (U,Mo) are critical nuclear fuel materials. These materials operate under extreme conditions (high temperatures, irradiation, and mechanical stress) which introduce complex defects and microstructural evolutions. Understanding and predicting their behavior is therefore essential for nuclear safety and fuel performance optimization. Traditional atomistic simulations rely on empirical or semi-empirical interatomic potentials, which may lack the required accuracy and transferability. In this context, machine-learning (ML) potentials, trained on high-fidelity quantum mechanical data, offer a promising alternative with improved accuracy and generality. More recently, the GRACE model, developed by Ralf Drautz and his group, is a state-of-the-art ML potential methodology that could significantly advance nuclear fuel material simulation.

Objectives: The objective of this internship is to probe the feasibility and performance of using and/or fine-tuning the GRACE model for atomistic simulations of nuclear fuel materials, specifically UO_2 , (U,Si), and (U,Mo). As an intern in the laboratory, you will investigate the applicability of the GRACE model to these materials, assessing its ability to reproduce key physical properties (e.g., elastic constants, defect formation energies, thermal conductivity). Then, you will invest the possibility of fine-tune the GRACE model for the target materials, if necessary, by incorporating additional training data or adjusting hyperparameters. The produced data will be systematically compared to the results of existing empirical or machine-learning potentials and experimental data to validate their performance.

Steps : (1) Bibliography and familiarization with the computational tools (Linux environment and high-performance computing clusters, LAMMPS, ABINIT code). (2) Understanding the GRACE Model: Study the architecture, training data, and capabilities of the GRACE model, as well as its implementation for MD simulations. (3) Simulation and testing of the existing models for UO_2 , (U,Si), and (U,Mo), by an analysis of the results for key properties (e.g., defect energies, thermal conductivity, elastic

properties) and compare them with experimental data or results from empirical potentials. (4) Fine-Tuning (if applicable): Adjust the GRACE model to improve its accuracy for the target materials, using additional ab initio data or experimental inputs. (5) Collaboration and Reporting: Work closely with the research team to interpret the obtained results, and prepare reports and presentations.

Context and Collaborations: This internship is hosted in a dynamic research laboratory, specializing in the multiscale simulation of nuclear fuels at the Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C). The intern will collaborate with researchers and PhD students at the laboratory, who are experts in atomistic simulations and nuclear fuel materials. External collaborations other CEA Services or other external institutions for technical support and guidance on are considered. The internship offers a unique opportunity to contribute to cutting-edge research at the intersection of machine learning, materials science, and nuclear engineering, with potential applications for improving nuclear fuel performance and safety.

- Masters degree in nuclear engineering.

- 6 months

- LAMMPS (MD), ABINIT (DFT).

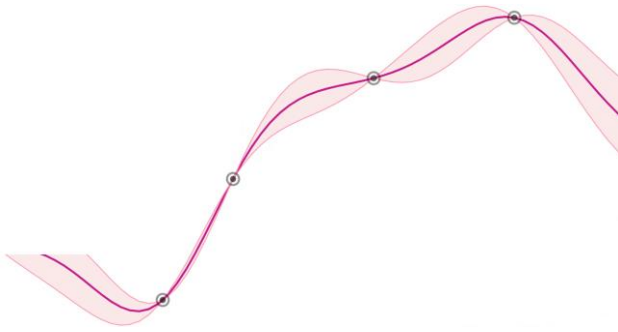
- Nuclear Fuel materials, atomistic simulations.

- Oui.

- Julien.tranchida@cea.fr



Développement de méta-modèles pour la prédiction de propriétés de coriums prototypes par Processus Gaussien



DEC/SESC/LM2C

Lors d'accidents nucléaires sévères, un mélange fondu de matériaux du cœur du réacteur, appelé corium en cuve, peut se former. Ces mélanges sont des liquides multi-composants dont les propriétés, telles que la densité, la viscosité et la tension de surface, varient fortement avec leur température et composition. Une prédiction précise de ces propriétés est cruciale pour modéliser le comportement du corium pendant un accident et concevoir des stratégies efficaces de confinement et de refroidissement. Les données expérimentales sont rares en raison des conditions extrêmes du corium, mais les simulations de dynamique moléculaire (DM) classiques fournissent des données complémentaires précieuses. Des modèles de substitution entraînés sur des bases de données combinant données expérimentales et de calcul peuvent prédire les propriétés du corium de manière efficace et précise dans une large gamme de conditions.

Objectifs: L'objectif de ce stage est de développer des méta-modèles pour les propriétés de mélanges de corium prototypes en utilisant la régression par processus gaussien (Gaussian Process Regression, GPR) et des bases de données multi-fidélité. En tant que stagiaire, vous générerez d'abord une base de données multi-fidélité combinant les données expérimentales disponibles et les données computationnelles issues de simulations de DM classiques des propriétés du corium (densité, viscosité, tension de surface) en fonction de la température et de la composition. Vous développerez ensuite des méta-modèles GPR et les validerez afin de prédire les propriétés du corium. Enfin, vous évaluerez la précision et la robustesse des méta-modèles développés en comparant avec des données expérimentales réservées (ensemble de test) leurs prédictions.

Étapes: (1) Bibliographie et familiarisation avec les outils de calcul (environnement Linux et calculateurs haute performance, LAMMPS pour les simulations de DM, bibliothèques Python pour la GPR). (2) Génération de données : collecter et préparer les données expérimentales sur le corium, et réaliser des simulations de DM classiques pour générer des données de densité, de viscosité et de tension de surface sur une gamme de températures, de compositions et de teneurs en oxygène. (3) Développement des méta-modèles : implémenter la GPR pour entraîner des méta-modèles sur la base de données

multi-fidélité, optimiser les hyperparamètres et valider par validation croisée et comparaison avec les données expérimentales. (4) Évaluer les performances des méta-modèles, notamment leur précision, la quantification des incertitudes et leur efficacité de calcul. (5) Préparer rapports ou présentations résumant la méthodologie, les résultats et les applications pour l'analyse de sûreté nucléaire.

Contexte et collaborations: Ce stage est accueilli dans un laboratoire de recherche dynamique, spécialisé dans la simulation multiéchelle des matériaux nucléaires, au centre de recherche de Cadarache, au sein de l'Institut de Recherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE). Le/la stagiaire collaborera avec les chercheurs et doctorants du laboratoire, experts en simulations atomistiques, comportement du corium et apprentissage automatique. Des collaborations externes sont envisagées avec les expérimentateurs et analystes de sûreté du CEA, donnant accès à des données expérimentales et à une connaissance des applications, ainsi qu'avec des spécialistes du CEA en mathématiques appliquées apportant leur soutien au développement des modèles. Ce stage offre une opportunité unique de contribuer à des recherches de pointe combinant simulations atomistiques, apprentissage automatique et modélisation multi-fidélité pour l'analyse des accidents sévères.

Ecole souhaitée :

Master 2 en physique de l'état solide, ingénierie nucléaire.

Durée : 6 mois

Méthodes logicielles :

LAMMPS (molecular dynamics), VASP/ABINIT (*ab initio* methods), AbTEM (TEM)

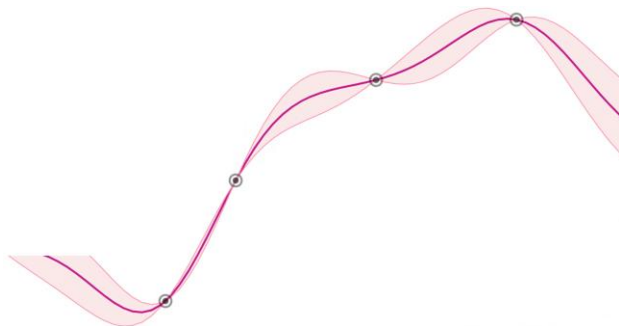
Mots clés :

Combustibles nucléaires, simulations atomistiques.

Possibilité de thèse : Oui

Contact : Julien.tranchida@cea.fr





Generating Meta-Models for Prototypical Corium properties using Gaussian Process Regression and Multi-fidelity Databases.

During severe nuclear accidents, a molten mixture of reactor core materials, referred to as in-vessel corium, can form. These mixtures are multi-component liquids whose properties, such as density, viscosity, and surface tension, strongly vary with temperature and composition. Accurately predicting these properties is critical to model corium behavior during an accident and design effective containment and cooling strategies. Experimental data are scarce due to the extreme corium conditions, but classical molecular dynamics (MD) simulations of prototypical compositions provide valuable complementary data. Surrogate models trained on combined experimental and computational data bases can predict corium properties efficiently and accurately across a wide range of conditions.

Objectives The objective of this internship is to develop meta-models for the properties of prototypical corium mixtures using Gaussian Process Regression (GPR) and multi-fidelity databases. As an intern, you will first generate a multi-fidelity database combining available experimental and computational data from classical MD simulations of corium properties (density, viscosity, surface tension) as a function of temperature and composition. You will then develop and validate GPR meta-models to predict corium properties. Finally, you will assess the accuracy and robustness of the developed meta-models by comparing their predictions with left-out (testing-set) experimental data.

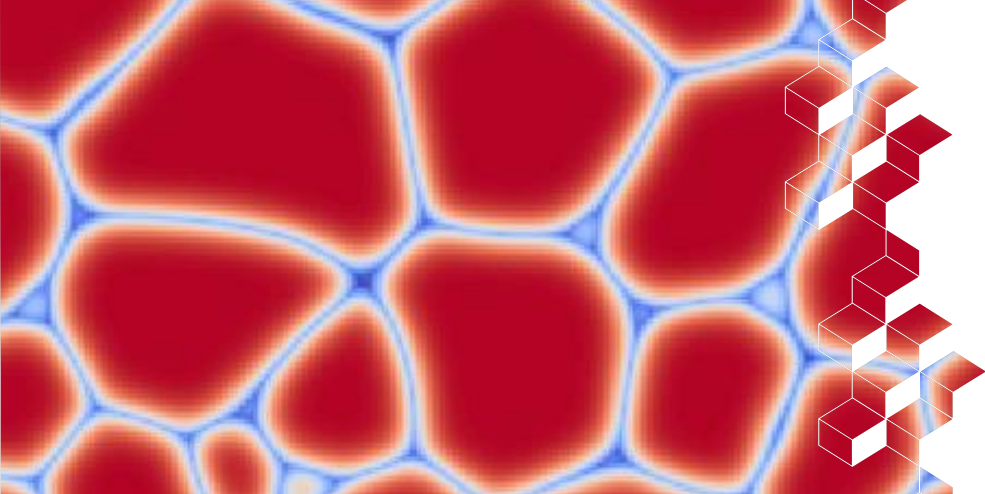
Steps (1) Bibliography and familiarization with the computational tools (Linux environment and high-performance computing clusters, LAMMPS for MD simulations, Python libraries for GPR). (2) Data generation: collect and curate experimental corium data, and perform classical MD simulations to generate density, viscosity, and surface tension data over a range of temperatures, compositions, and oxygen contents. (3) Meta-model development: implement GPR to train meta-models on the multi-fidelity database, optimize hyperparameters, and validate

using cross-validation and comparison with experimental data. (4) Assess the performance of the meta-models, including their accuracy, uncertainty quantification, and computational efficiency. (5) Prepare reports or presentations summarizing the methodology, results, and applications for nuclear safety analysis.

Context and Collaborations This internship is hosted in a dynamic research laboratory specializing in multiscale simulation of nuclear materials at the Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C). The intern will collaborate with laboratory researchers and PhD students, experts in atomistic simulations, corium behavior, and machine learning. External collaborations are considered with CEA experimentalists and safety analysts, providing access to experimental data and application insight, and with CEA applied-mathematics specialists supporting model development. The internship offers a unique opportunity to contribute to cutting-edge research combining atomistic simulations, machine learning, and multi-fidelity modeling for severe accident analysis.

- Masters degree in nuclear engineering.
- 6 months
- LAMMPS (MD), ABINIT (DFT).
- Nuclear Fuel materials, atomistic simulations.
- Oui.
- Julien.tranchida@cea.fr





Modélisation multiéchelle des gaz de fission pour un jumeau numérique d'expériences sur les combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C

Dans les réacteurs nucléaires, le comportement du combustible dépend de nombreux phénomènes physiques qui se produisent à l'échelle microscopique, de l'atome jusqu'aux grains qui constituent le matériau. Ce stage vise à étudier certains de ces phénomènes liés aux gaz de fission à l'aide de méthodes de simulation numérique, afin de mieux comprendre et modéliser leurs conséquences à l'échelle du réacteur.

Contexte

L'énergie nucléaire contribue à la décarbonation de la production d'électricité et devrait voir son rôle se renforcer dans les prochaines décennies. Dans ce contexte, une meilleure utilisation des ressources passe notamment par une connaissance précise du comportement du combustible en réacteur, en particulier du dioxyde d'uranium (UO_2), le plus répandu.

Les gaz de fission (xénon, krypton) jouent un rôle important dans ce comportement. Très peu solubles dans l' UO_2 , ils précipitent sous forme de bulles nanométriques à l'intérieur des grains, et une fraction diffuse vers les joints de grains, où des bulles plus grandes peuvent s'interconnecter et conduire au relâchement du gaz. Ces mécanismes contribuent au gonflement du combustible et peuvent limiter la durée de vie de l'élément combustible en réacteur. Des expériences d'irradiation et de post-irradiation permettent de mesurer et de comprendre ces phénomènes. La reproduction de ces expériences par la simulation numérique aide à interpréter les résultats, à analyser les phénomènes physiques fondamentaux moteurs du comportement observé et à extrapoler à d'autres conditions telles que des situations accidentelles à prévenir.

Objectifs du stage

Le/la stagiaire participera au développement du logiciel Inferno, qui simule l'évolution de la microstructure du combustible en vue de constituer un jumeau numérique d'expériences sur échantillons irradiés. Il s'agira d'enrichir le modèle physique du code par des études multiéchelles, en priorité pour le comportement du gaz à l'intérieur des grains d' UO_2 .

Les missions

- Simuler par la méthode du champ de phase l'évolution des bulles de gaz dans l' UO_2 , confronter les résultats aux données expérimentales et tester différentes hypothèses de modélisation.

- Effectuer des calculs à plus petite échelle (*rate theory*, dynamique moléculaire) afin d'estimer certains paramètres d'entrée du modèle champ de phase, en particulier ceux qui déterminent la quantité de gaz atteignant les joints de grains.
- Implémenter dans le code Inferno le paramétrage améliorés grâce aux études effectuées.

Compétences à acquérir

- Mise en œuvre de méthodes de simulation numérique à différentes échelles.
- Connaissance des mécanismes physiques régissant le comportement du combustible sous irradiation.
- Démarche scientifique, de la formulation d'hypothèses à leur confrontation avec l'expérience.
- Développement en équipe d'un logiciel scientifique en Python, avec gestion de versions (Git) et tests.

Ce stage permettra de participer à des travaux de recherche sur le combustible nucléaire et d'acquérir des compétences en physique des matériaux, en simulation numérique et en développement logiciel.

Le stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C).

■ Formation souhaitée :

MASTER 2 ou équivalent
Physique du solide
Physique numérique
Science des matériaux
Mécanique des matériaux

■ Durée du stage :

6 mois (stage de fin d'études)

■ Méthode/logiciel(s):

Champ de phase, *rate theory*,
dynamique moléculaire
Codes : Inferno, Margaret,
Sciantix, LAMMPS

■ Mots clés :

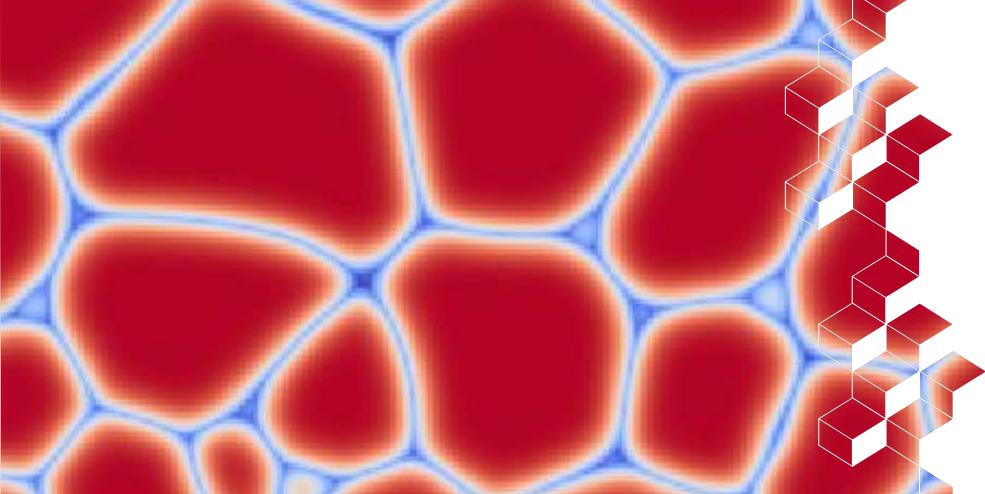
Combustibles nucléaires
Gaz de fission
Microstructure
Simulations numériques

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

MESSINA Luca
luca.messina@cea.fr



Multiscale modeling of fission gas behavior toward a digital twin of nuclear fuel experiments

DEC/SESC/LM2C

The in-reactor performance of nuclear fuel depends on numerous physical phenomena spanning several length scales, from atomic-level mechanisms to microstructural evolution at the grain scale. This internship involves the numerical simulation of the phenomena involving fission gas, with the aim of improving the understanding and prediction of their effects on macroscopic fuel behavior.

Context

Nuclear power contributes to decarbonizing electricity generation, and its role is expected to grow over the coming decades. In this context, a more efficient use of resources requires, among other things, a detailed understanding of in-reactor fuel behavior, especially that of uranium dioxide (UO_2), the most widely used fuel.

Fission gases (xenon and krypton) play an important role in this behavior. Owing to their very low solubility in UO_2 , they precipitate as nanoscale bubbles within the grains, while a fraction diffuses to the grain boundaries, where larger bubbles can interconnect and lead to fission gas release. These mechanisms contribute to fuel swelling and can limit fuel rod lifetime in the reactor. Irradiation and post-irradiation experiments are used to measure and understand these phenomena. Reproducing these experiments numerically is important to interpret their results, investigate the fundamental physical processes driving the observed behavior, and extrapolate to other conditions, including accident scenarios relevant to reactor safety.

Internship objectives

The intern will contribute to the development of Inferno, a code that simulates the evolution of the fuel microstructure and, ultimately, to serve as a digital twin of experiments on irradiated samples. The goal of the internship is to improve its physical model through multiscale studies, with a primary focus on intragranular gas behavior in UO_2 .

Tasks

- Run phase-field simulations of gas bubble evolution in UO_2 , compare the results with experimental data, and test alternative modeling assumptions.
- Perform calculations at smaller length scales (rate theory, molecular dynamics) to estimate selected input parameters of the phase-field model, in particular those that control the amount of gas reaching the grain boundaries.
- Implement in Inferno the improved models and parameters from these studies.

What you'll learn

- Practical experience with numerical simulation methods at different length scales.
- Knowledge of the physical mechanisms governing fuel behavior under irradiation.
- A scientific approach, from formulating hypotheses to testing them against experiments.
- Collaborative development of scientific software in Python, with version control (Git) and testing.

This internship provides an opportunity to take part in nuclear fuel research and to develop skills in materials physics, numerical simulation, and software development.

This internship is hosted in a dynamic research laboratory specializing in multiscale simulation of nuclear materials at the Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C).

■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent
Solid State Physics
Computational Physics
Materials Science
Mechanics of materials

■ Durée du stage :

6 months (Master's thesis)

■ Méthode/logiciel(s):

Phase field, rate theory (Inferno, Margaret, Sciantix)

■ Mots clés :

Computational Materials,
Simulations, Nuclear fuels,
Fission gases, Microstructure

■ Possibilité de thèse :

Yes

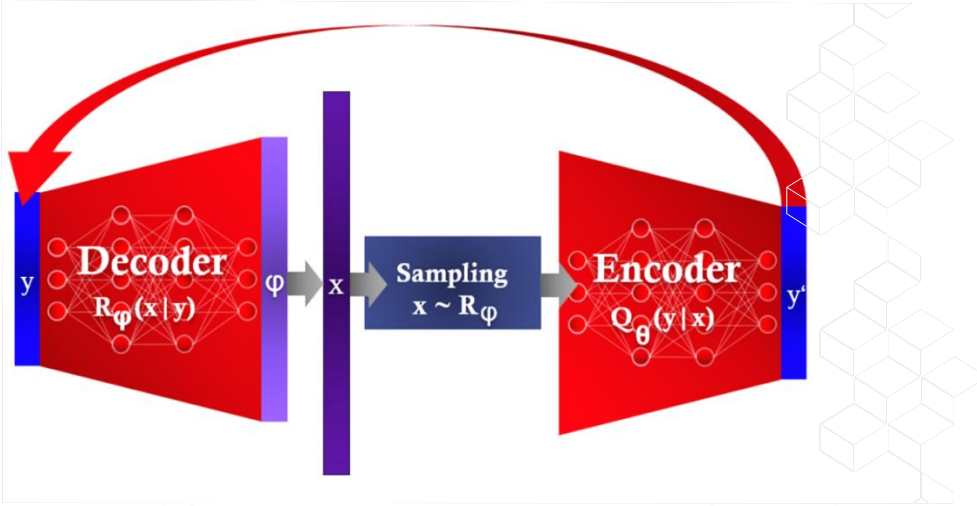
■ Contact :

MESSINA Luca
luca.messina@cea.fr



Descripteurs atomiques pour la modélisation par intelligence artificielle des combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C



Les propriétés de certains combustibles nucléaires dépendent de la façon dont les atomes se répartissent et se déplacent dans le cristal. Ce stage a pour objectif de contribuer au développement d'une méthode d'intelligence artificielle conçue dans notre laboratoire pour décrire cette répartition et ces déplacements atomiques, afin de mieux prédire les propriétés de ces matériaux.

Contexte

La simulation numérique aidée par l'intelligence artificielle occupe une place croissante dans l'étude des combustibles nucléaires, dont le comportement doit être prédit en fonctionnement normal comme en situation accidentelle. Certains d'entre eux, comme les oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (MOX) ou les alliages uranium-molybdène (U-Mo), sont chimiquement désordonnés, c'est-à-dire que leurs éléments sont répartis de façon aléatoire dans le cristal.

Le calcul de leurs propriétés à l'échelle atomique complète les mesures expérimentales, mais il se heurte au très grand nombre d'arrangements possibles des atomes sur le réseau cristallin. La méthode d'intelligence générative PULSE^(1,2) aide à contourner cette difficulté grâce à un modèle qui génère un petit nombre de configurations représentatives, dont elle déduit les propriétés thermodynamiques du matériau. Elle place toutefois chaque atome exactement sur un site du cristal, alors que l'agitation thermique et les différences de taille entre éléments l'en écartent. Décrire ces déplacements suppose notamment de représenter l'environnement de chaque atome sous une forme exploitable par le modèle, à l'aide de « descripteurs atomiques ». Ces descripteurs traduisent les positions cartésiennes des atomes et les relations chimiques et géométriques entre eux en vecteurs traitables par les réseaux de neurones.

Objectifs du stage

Le/la stagiaire participera aux travaux visant à étendre la méthode PULSE à la description des déplacements atomiques dans le MOX et les alliages U-Mo. Ils porteront en priorité sur la comparaison de descripteurs atomiques existants, appliqués à ces combustibles et à des systèmes modèles, en vue de proposer des pistes d'intégration dans PULSE.

Les missions

- Générer par dynamique moléculaire, à différentes températures, des configurations atomiques de ces systèmes, et analyser les déplacements des atomes autour de leurs positions d'équilibre.

- Tester en priorité plusieurs descripteurs atomiques existants, notamment leur sensibilité aux petits déplacements et la possibilité de reconstruire les positions atomiques à partir de ces descripteurs.
- Proposer différentes manières d'intégrer ces descripteurs dans PULSE et, le cas échéant, en tester certaines sur un système modèle.

Compétences à acquérir

- Méthodes de simulation à l'échelle atomique et d'apprentissage automatique appliquées aux matériaux.
- Connaissances en physique statistique et en physique des matériaux pour l'énergie nucléaire.
- Démarche scientifique, de l'étude bibliographique à l'analyse critique des résultats.
- Programmation scientifique en Python au sein d'une équipe de recherche.

Ce stage permettra de participer à des travaux de recherche à l'interface entre la physique des matériaux nucléaires et l'intelligence artificielle, et d'acquérir des compétences en simulation atomistique, en physique statistique et en apprentissage automatique.

Le stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C).

⁽¹⁾ [Karcz et al., Sci. Rep. 16, 14568 \(2026\).](#)

⁽²⁾ [Bernard et al., arxiv:2605.28594.](#)

Formation souhaitée :

MASTER 2 ou équivalent
Mathématiques appliquées
Physique numérique
Science des matériaux
Physique/chimie du solide

Durée du stage :

6 mois (stage de fin d'études)

Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire,
autoencodeurs variationnels,
descripteurs, PULSE, LAMMPS

Mots clés :

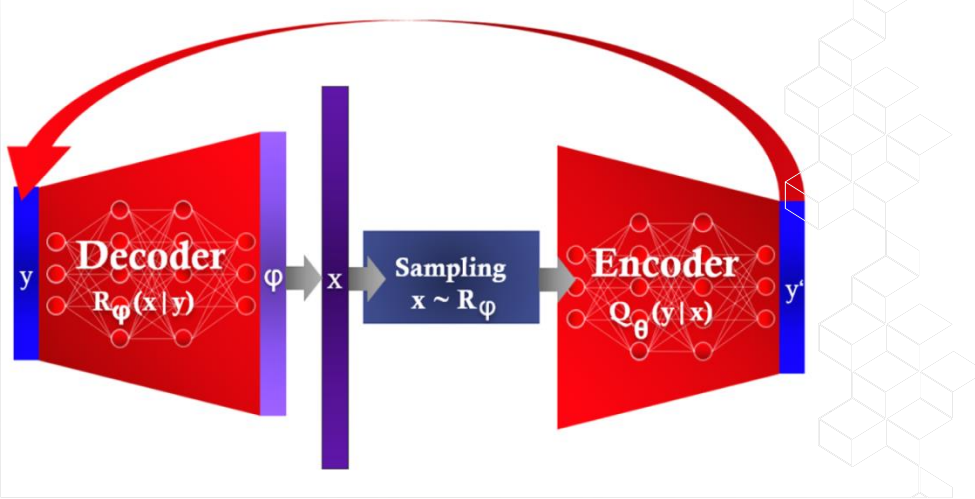
Intelligence artificielle
Combustibles nucléaires
Physique des matériaux
Simulations numériques

Possibilité de thèse :

Oui

Contact :

MESSINA Luca
luca.messina@cea.fr



Atomic descriptors for AI-driven modeling of nuclear fuels

DEC/SESC/LM2C

The properties of several nuclear fuels depend on how atoms are distributed over the crystal lattice and displaced from their lattice sites. This internship contributes to the development of an artificial intelligence method designed in our laboratory to describe this atomic distribution and these displacements, with the aim of improving the prediction of fuel properties.

Context

AI-assisted computer simulations are increasingly used to study nuclear fuels, whose behavior must be predicted under normal operating and accident conditions. Some of these fuels, such as uranium-plutonium mixed oxides (MOX) and uranium-molybdenum (U-Mo) alloys, are chemically disordered, with their elements randomly distributed over the lattice sites.

Atomic-scale calculations are a necessary complement to experimental measurements, but are limited by the combinatorial explosion of the possible atomic arrangements on the lattice. The generative AI PULSE method^(1,2) helps overcome this limitation with a model that produces a small set of representative configurations, from which the thermodynamic properties of the material are derived. However, PULSE generates every atom on its equilibrium lattice site, whereas thermal vibrations and atomic size mismatch displace atoms from these positions. Describing these displacements requires representing the local environment of each atom by means of atomic descriptors, which encode atomic positions and their chemical and geometric relationships into vectors suitable as inputs for neural networks.

Internship objectives

The intern will contribute to extending the PULSE method to the description of atomic displacements in MOX and U-Mo alloys. The work will focus primarily on comparing existing atomic descriptors on these fuels and model systems and propose ways of integrating them into PULSE.

Tasks

- Generate atomic configurations of these systems at several temperatures using molecular dynamics, and analyze atomic displacements around equilibrium positions.

- Evaluate several existing descriptors, in particular their sensitivity to small displacements and whether atomic positions can be reconstructed from them.
- Propose different ways of integrating these descriptors into PULSE and, where appropriate, test some of them on a model system.

What you'll learn

- Atomic-scale simulation and machine learning methods applied to materials.
- Statistical physics and materials physics for nuclear energy applications.
- Scientific methodology, from literature review to critical analysis of results.
- Scientific programming in Python within a research team.

This internship provides experience in research at the interface between nuclear materials physics and artificial intelligence, including atomic-scale simulations, statistical physics, and machine learning.

This internship is hosted in a dynamic research laboratory specializing in multiscale simulation of nuclear materials at the Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modeling (LM2C).

(1) [Karcz et al., Sci. Rep. 16, 14568 \(2026\).](#)

(2) [Bernard et al., arxiv:2605.28594.](#)

Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent
Applied mathematics
Computational Physics
Solid state physics
Materials science

Durée du stage :

6 months (Master's thesis)

Méthodes/logiciels :
autoencoders, descriptors, PULSE, LAMMPS

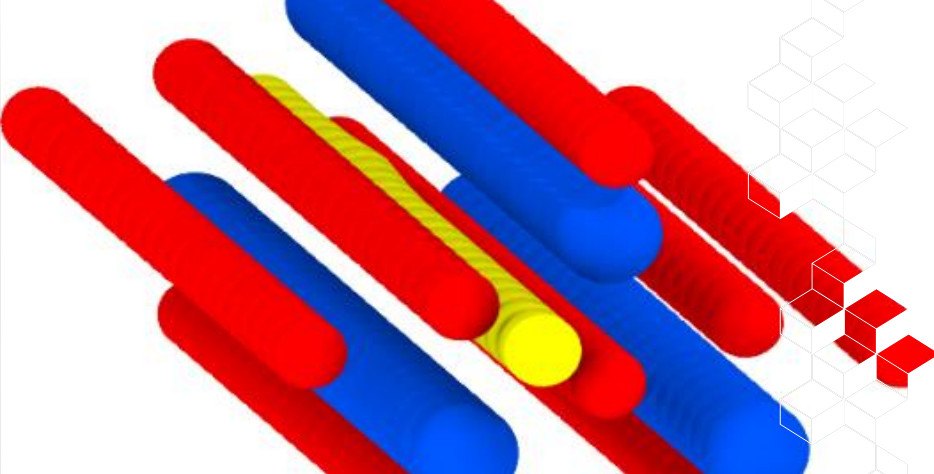
Artificial Intelligence
Nuclear Fuels
Mots clés :
Computational Materials
Materials physics

Yes

Possibilité de thèse :

Contact :
luca.messina@cea.fr

MESSINA Luca



Étude par dynamique moléculaire de l'interaction entre défauts étendus et pointe thermique dans les combustibles UO_2 et MOX

DEC/SESC/LM2C

Le dioxyde d'uranium UO_2 et le combustible mixte MOX, $(\text{U,Pu})\text{O}_2$, sont les combustibles nucléaires de référence dans les réacteurs actuels et futurs. Sous irradiation, les fragments de fission déposent leur énergie par interaction électronique le long de leur parcours, provoquant un échauffement local, intense et très bref appelé pointe thermique. Celle-ci interagit avec une microstructure qui contient déjà des défauts étendus : réseaux de dislocations, boucles prismatiques, cavités et bulles de gaz de fission. Savoir si le passage répété de ces pointes thermiques restaure la microstructure ou favorise au contraire l'accumulation des défauts est un enjeu important pour prédire le gonflement du combustible, le relâchement des gaz de fission et son comportement mécanique en réacteur.

Objectifs:

L'objectif principal de ce stage est d'étudier, par des simulations de dynamique moléculaire classique, l'interaction entre les défauts étendus du combustible et une pointe thermique représentative d'un événement de fission dans UO_2 et/ou dans le MOX. Il s'agira de déterminer si le dépôt d'énergie conduit à une restauration des défauts (annihilation des dislocations, dissolution des boucles) ou à leur accumulation (croissance des boucles, mûrissement des cavités, ancrage du réseau de dislocations).

La première étape consistera à construire et à équilibrer des boîtes de simulation contenant des défauts étendus contrôlés. La pointe thermique sera ensuite simulée par dépôt d'énergie cinétique dans une région cylindrique représentant la trace du fragment de fission. L'analyse quantitative des configurations obtenues (lignes de dislocations, défauts ponctuels, taille et morphologie des cavités) sera menée en fonction de l'énergie déposée, de la distance entre la trace et le défaut, de la température initiale et de la nature du combustible.

Etapes du stage:

Le ou la stagiaire débutera par une étude bibliographique (contexte de l'étude, endommagement sous irradiation, défauts étendus, pointe thermique), puis prendra en main les outils de calcul : environnement Linux, supercalculateurs du TGCC, code de dynamique moléculaire LAMMPS et post-traitement en Python via l'interface d'OVITO. Il ou elle entrera ensuite dans une phase de production et d'analyse des résultats de simulation.

Environnement de travail:

Le ou la stagiaire sera accueilli(e) sur le centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C).

Ce laboratoire très dynamique, spécialisé dans la modélisation des propriétés fondamentales et du comportement des combustibles nucléaires, compte 11 chercheurs permanents et autant d'étudiants en thèse. Le centre est situé en Provence, entre les parcs naturels du Verdon et du Lubéron, et est desservi par des lignes de bus gratuites depuis les principales villes alentours (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis...). Le télétravail est possible après une période d'acclimatation au sein de l'équipe.

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou équivalent
Science des matériaux
Physique/chimie du solide

■ Durée du stage :

5 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire /
LAMMPS / OVITO /
Environnement Linux

■ Mots clés :

Combustibles nucléaires,
dynamique moléculaire,
irradiation

■ Possibilité de thèse :

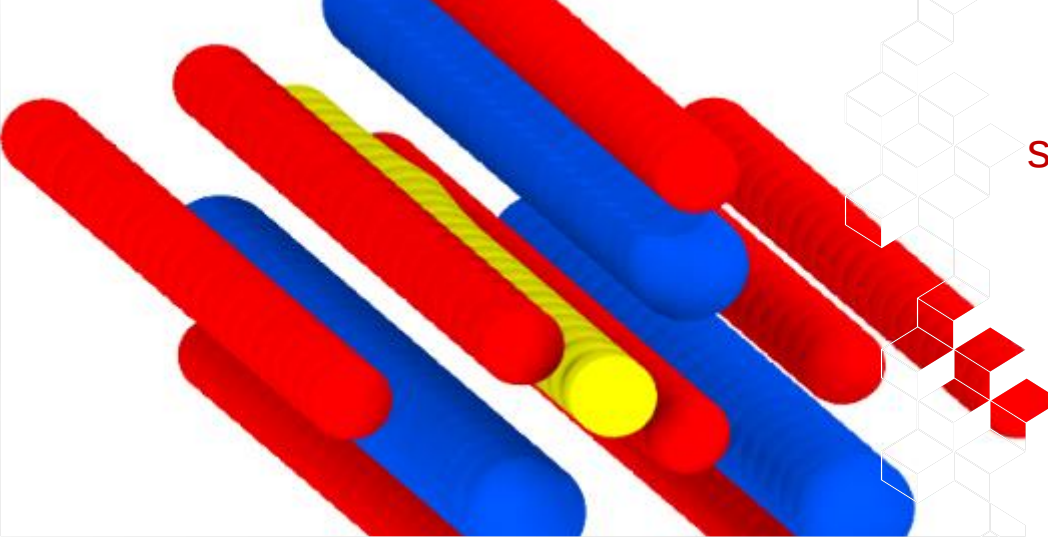
Oui

■ Contact :

PIVANO Adrien

adrien.pivano@cea.fr





Molecular dynamics study of the interaction between extended defects and thermal spikes in UO_2 and MOX fuels

DEC/SESC/LM2C

Uranium dioxide UO_2 and mixed oxide fuel MOX, $(\text{U,Pu})\text{O}_2$, are the reference nuclear fuels for current and future reactors. Under irradiation, fission fragments deposit their energy through electronic interactions along their path, causing intense, highly localised and very short-lived heating known as a thermal spike. This spike interacts with a microstructure that already contains extended defects: dislocation networks, prismatic loops, cavities and fission gas bubbles. Determining whether the repeated passage of these thermal spikes restores the microstructure or, on the contrary, promotes the accumulation of defects is a key issue for predicting fuel swelling, fission gas release and the mechanical behaviour of the fuel in reactor.

Objectives:

The main objective of this internship is to study, using classical molecular dynamics simulations, the interaction between extended defects in the fuel and a thermal spike representative of a fission event in UO_2 and/or MOX. The aim is to determine whether the energy deposition leads to defect recovery (dislocation annihilation, loop dissolution) or to defect accumulation (loop growth, cavity coarsening, pinning of the dislocation network).

The first step will be to build and equilibrate simulation boxes containing controlled extended defects. The thermal spike will then be simulated by depositing kinetic energy in a cylindrical region representing the fission fragment track. The resulting configurations (dislocation lines, point defects, cavity size and morphology) will be analysed quantitatively as a function of the deposited energy, the distance between the track and the defect, the initial temperature and the type of fuel.

Internship plan:

The intern will start with a literature review (nuclear fuel context, irradiation damage, extended defects, thermal spikes), then get to grips with the computational tools: Linux environment, TGCC supercomputers, the LAMMPS molecular dynamics code and Python post-processing through the OVITO interface. They will then move on to running simulations and analysing the results.

Work environment:

This internship will take place at the CEA Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Fuel Behavior Modelling (LM2C).

This very dynamic laboratory, specialised in modelling the fundamental properties and behaviour of nuclear fuels, has 11 permanent researchers and as many PhD students. The centre is located in Provence, between the Verdon and Luberon natural parks, and is served by free bus lines from the main surrounding towns (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis, etc.). Remote work is possible after an initial settling-in period with the team.

■ Formation souhaitée :

Master's degree, 2nd year (M2)
Solid state physics
Materials science

■ Durée du stage :

5 to 6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Molecular dynamics / LAMMPS /
OVITO / Linux environment

■ Mots clés :

Nuclear fuels, molecular
dynamics, irradiation

■ Possibilité de thèse :

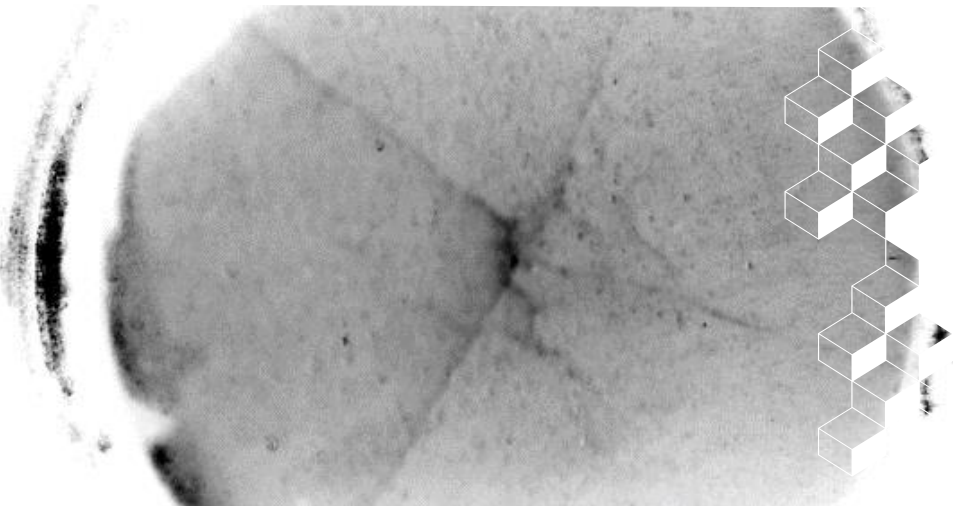
Yes

■ Contact :

PIVANO Adrien

adrien.pivano@cea.fr





Analyse numérique d'essais de rupture du dioxyde d'uranium par chauffe laser

DEC/SESC/LMCP

Ce stage vise à analyser, par simulations aux éléments finis reposant sur des modèles d'endommagement à gradient, la fissuration du combustible nucléaire lors d'essais de chauffage laser. L'objectif est d'identifier les ajustements à apporter aux conditions expérimentales afin d'améliorer la capacité de ces essais à caractériser des paramètres physiques clés.

Le dioxyde d'uranium est une céramique utilisée comme combustible dans les réacteurs à eau pressurisée du parc électronucléaire français : les éléments combustible de ces réacteurs, appelés crayons, se présentent sous la forme d'un empilement de pastilles de combustible dans une gaine cylindrique en alliage de zirconium.

Le dioxyde d'uranium est un matériau fragile et les pastilles de combustible se fissurent lors de la première montée en puissance du réacteur puis au cours de différentes situations de fonctionnement. Ce phénomène influence significativement le comportement thermomécanique des crayons combustibles. Sa compréhension et sa modélisation dans les simulations numériques constituent donc un enjeu important pour la prédiction du comportement du combustible en réacteur.

Dans le cadre du doctorat d'Hugo Fuentes réalisé au CEA (2022-2025, DES/IRESNE/DEC/SA3E/LAMIR), une campagne de fragmentation de pastilles de dioxyde d'uranium par chauffe laser a été menée [1]. Cette chauffe permet de reproduire des gradients de température représentatifs des conditions en réacteurs. Pour chaque essai, des films montrant l'évolution des fissures et l'évolution des températures en surface de pastille sont disponibles.

L'objet de ce stage est de simuler et analyser les essais de chauffe laser réalisés à l'aide de modèles d'endommagement à gradient développés au CEA (IRESNE DES/DEC/SESC/LMCP) [2].

L'objectif est de proposer des modifications des paramètres expérimentaux et du dispositif expérimental pour améliorer

l'identifiabilité de paramètres clés tels que contrainte à rupture, énergie de fissuration et coefficients d'échange de chaleurs effectifs via les lèvres de la fissure. Cette analyse devra tenir compte des données expérimentales disponibles:

- films montrant l'évolution des fissures
- cartes thermiques mesurées expérimentalement.

Ce stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire des Méthodes numériques et des Composants Physiques de PLEIADES* (LMCP).

Ce travail à l'interface entre mécanique des matériaux, simulation numérique et analyse de données expérimentales permettra au stagiaire de développer des compétences en modélisation multiphysique, en interprétation de résultats et en démarche scientifique, dans le domaine de la recherche sur les combustibles nucléaires.

Références

[1] Fuentes, Hugo, Doualle, Thomas, Colin, Christian, Socié, Adrien, Cifuentes, C, Helfer, Thomas, Gallais, Laurent and Lebon, Frédéric. Numerical and experimental simulation of nuclear fuel fragmentation via laser heating of ceramics. In : Proceeding of top fuel 2024. Grenoble, 29 September 2024.

[2] Nava Soto, Pedro, Fandeur, Olivier, Siedel, David, Helfer, Thomas and Besson, Jacques. Description of thermal shocks using micromorphic damage gradient models. In : European Solid Mechanics Conference. Lyon,

* PLEIADES est la plateforme logicielle de simulation du comportement des combustibles du CEA

■ Formation souhaitée :

Master II en mécanique non linéaire du solide

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

MFront, MFEM/MGIS ou Manta

■ Mots clés :

Fissuration - Eléments Finis. – calcul haute performance

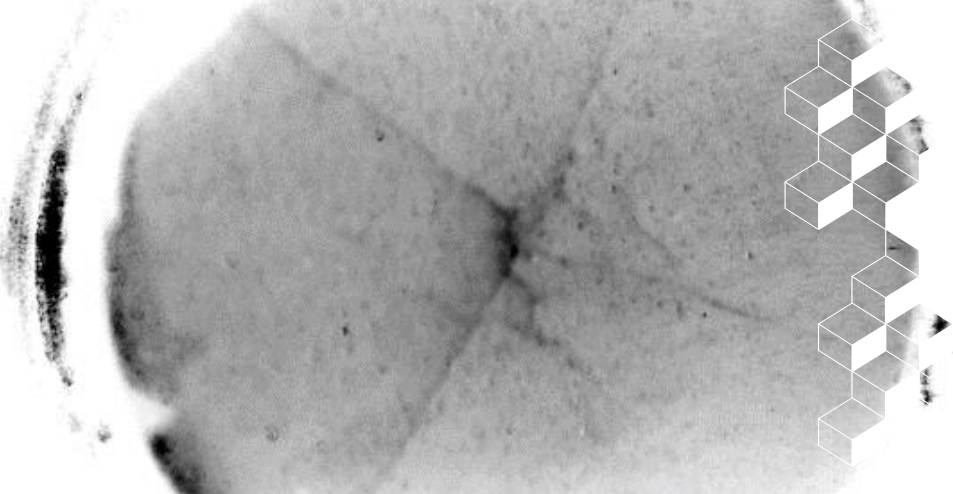
■ Possibilité de thèse :

Non, mais le candidat pourra postuler aux différentes thèses proposées par le laboratoire

■ Contact :

HELPER Thomas
thomas.helfer@cea.fr





Numerical analysis of uranium dioxide fracture tests induced by laser heating: sensitivity analyses and design of new experiments

DEC/SESC/LMCP

This internship aims to describe the cracking of nuclear fuel during laser heating tests using the finite element method and gradient damage models, to compare numerical and experimental results and propose modifications to the experimental setup to ensure of key material parameters identifiability.

Uranium dioxide is a ceramic material used as fuel in the pressurized water reactors of France's nuclear power plants. The fuel elements in these reactors, known as fuel rods, consist of a stack of fuel pellets enclosed in a cylindrical zirconium alloy cladding.

Uranium dioxide is a brittle material, and fuel pellets crack during the reactor's initial power ramp-up and under various operating conditions. This phenomenon significantly affects the thermomechanical behaviour of fuel rods. Understanding and modelling this process in numerical simulations is therefore essential for predicting fuel behaviour under reactor operating conditions.

As part of Hugo Fuentes' PhD at the CEA (2022-2025, DES/IRESNE/DEC/SA3E/LAMIR), a campaign to fragment uranium dioxide pellets using laser heating was conducted [1]. This heat treatment makes it possible to reproduce the temperature gradients representative of nominal reactor conditions. For each test, videos showing the evolution of cracks and the evolution of temperatures on the pellet surface are available.

The purpose of this internship is to simulate and analyze the laser heating tests carried out using gradient damage models developed at the CEA (DES/IRESNE/DEC/SESC/LMCP)[2].

The intern will use simulation results to modify a priori the experimental setup in order to ensure the Identifiability of key material parameters (strength, fracture energy, heat transfer coefficient through cracks), taking into account the available experimental data:

-films showing the evolution of cracks

← measured thermal maps.

This internship will take place at the CEA Cadarache Research Center, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the PLEIADES* Laboratory for Numerical Methods and Physical Components (LMCP).

By working at the interface between materials mechanics, numerical simulation, and experimental data analysis, the intern will develop skills in multiphysics modelling, results interpretation, and scientific methodology, in the field of nuclear fuel research.

References

[1] Fuentes, Hugo, Doualle, Thomas, Colin, Christian, Socié, Adrien, Cifuentes, C, Helfer, Thomas, Gallais, Laurent and Lebon, Frédéric. Numerical and experimental simulation of nuclear fuel fragmentation via laser heating of ceramics. In : Proceeding of top fuel 2024. Grenoble, 29 September 2024

[2] Nava Soto, Pedro, Fandeur, Olivier, Siedel, David, Helfer, Thomas and Besson, Jacques. Description of thermal shocks using micromorphic damage gradient models. In : European Solid Mechanics Conference

*PLEIADES is the CEA's software platform for simulating nuclear fuel behaviour.

■ Formation souhaitée :

Master II in non linear computation mechanics

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

MFront, FEM/Manta or MFEM/MGIS

■ Mots clés :

MFront, FEM/Manta or MFEM/MGIS

■ Possibilité de thèse :

Not directly. Possibility to apply to other available thesis in the laboratory.

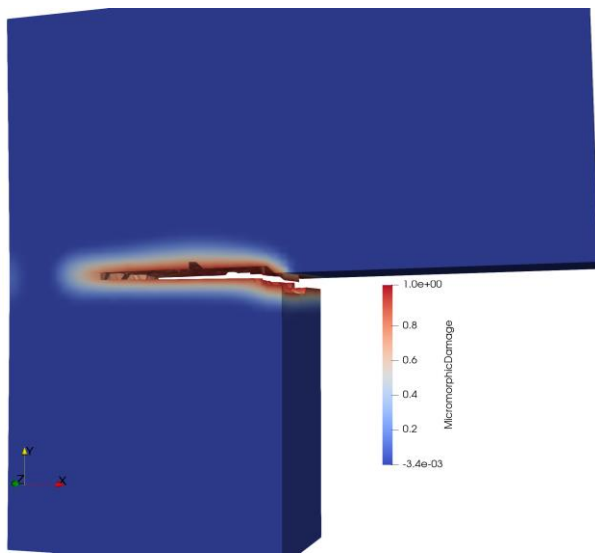
■ Contact :

HELPER Thomas
thomas.helfer@cea.fr

Développement et Vérification des Codes de Thermomécanique MFEM/MGIS et Manta pour la modélisation de la rupture des matériaux fragiles

DEC/SESC/LMCP

*



L'objectif du stage est de contribuer à la vérification croisée des codes de thermomécanique de nouvelle génération MFEM/MGIS et Manta, développés au CEA, dans le cadre de leur application à une approche innovante de la modélisation de la fissuration des matériaux fragiles reposant sur des modèles d'endommagement à gradient.

La plateforme de simulation des combustibles nucléaires PLEIADES, développée au CEA, s'oriente vers l'utilisation de codes de mécanique de nouvelle génération, MFEM/MGIS [1, 2] et Manta [3]. Grâce à leurs capacités de calcul haute performance (HPC), ces codes offrent de nouvelles perspectives pour la modélisation du comportement des matériaux, notamment de leur rupture fragile à l'aide de modèles d'endommagement à gradient.

Bien que ces modèles soient de plus en plus utilisés, leur mise en œuvre numérique demeure délicate. Une validation croisée entre différents codes est donc nécessaire pour vérifier la robustesse de leurs implémentations, tant en termes de précision des résultats que de performances numériques..

L'objet du stage est d'appliquer cette démarche de validation croisée à une nouvelle approche de la modélisation de la refermeture des fissures, développée dans le cadre de la thèse de Pedro Nava Soto et explorée lors d'un précédent stage. Les premiers résultats obtenus sont prometteurs et méritent d'être approfondis afin d'évaluer le potentiel de cette approche.

Différents calculs de structures seront considérés pour d'une part démontrer la versatilité de cette approche en explicitant les paramètres influant sur la nucléation et la propagation des fissures et d'autre part faire la démonstration d'un niveau de vérification suffisant pour publier les résultats obtenus.

Ce stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire des Méthodes numériques et des Composants Physiques de PLEIADES (LMCP).

À l'interface entre développement numérique, mécanique des structures et calcul haute performance, ce travail lui permettra de développer des compétences en simulation numérique avancée, en analyse critique des résultats et en démarche de validation scientifique, tout en contribuant à des travaux de recherche susceptibles de donner lieu à une publication.

Référence

[1] The MFEM/MGIS solver: Overview and applications to large-scale simulations at mesoscale. CSMA 2026 17ème colloque national en calcul des structures. Giens, France, Mai 2026. <https://cea.hal.science/cea-05506207>

[2] MFEM/MGIS, a HPC mini-application targeting nonlinear thermo-mechanical simulations of nuclear fuels at mesoscale. Journal of Open Source Software.2025 <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.07719>

[3] MANTA: an industrial-strength open-source high performance explicit and implicit multi-physics solverMANTA: an industrial-strength open-source high performance explicit and implicit multi-physics solver. CSMA 2024 16ème colloque national en calcul des structures. Giens, France, Mai 2024. <https://hal.science/hal-04610968>

■ Formation souhaitée :

- Master II en simulation mécanique des solides
- 3ème année d'école d'ingénieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Gradient damage models, MFEM/MGIS, Manta, MFront

■ Mots clés :

Simulation numérique.
Elements finis

■ Possibilité de thèse :

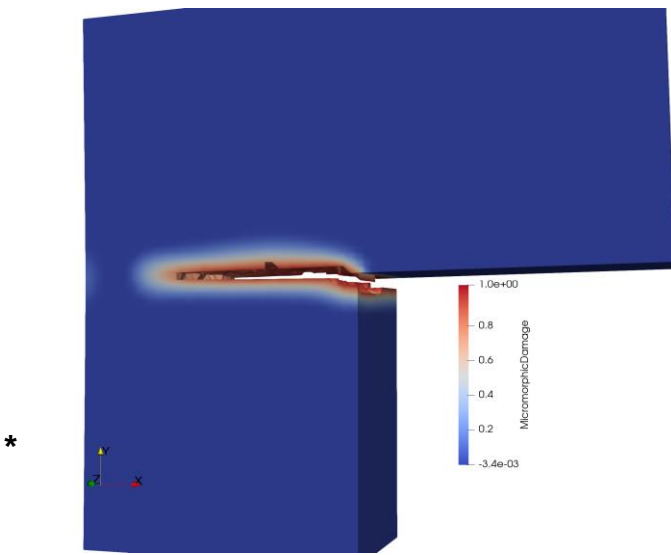
Non - le candidat pourra postuler aux différentes thèses proposées par le laboratoire

■ Contact :

HELPER Thomas
thomas.helfer@cea.fr

Development and Verification of the MFEM/MGIS and Manta Thermomechanical Codes for Modelling the Fracture of Brittle Materials

DEC/SESC/LMCP



The aim of this internship is to contribute to the cross-code verification of the next-generation thermomechanical codes MFEM/MGIS and Manta, developed at CEA, as applied to an innovative approach to modelling fracture in brittle materials using gradient damage models.

The PLEIADES nuclear fuel simulation platform, developed at CEA, is moving towards the use of next-generation mechanics codes, MFEM/MGIS [1, 2] and Manta [3]. Thanks to their high-performance computing (HPC) capabilities, these codes open up new possibilities for modelling material behaviour, particularly brittle fracture using gradient damage models.

Although these models are increasingly used, their numerical implementation remains challenging. Cross-code verification is therefore required to assess the robustness of their implementations, in terms of both result accuracy and numerical performance.

The aim of this internship is to apply this cross-code verification approach to a new method for modelling crack closure, developed as part of Pedro Nava Soto's PhD thesis and explored during a previous internship. The initial results are promising and warrant further investigation to assess the potential of this approach.

Various structural analyses will be carried out, firstly to demonstrate the versatility of the approach by identifying the parameters that influence crack nucleation and propagation, and secondly to demonstrate a sufficient level of verification for the results to be published.

The internship will take place at the CEA Cadarache Centre, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the PLEIADES Laboratory for numerical Methods and PLEIADES Physical Components (LMCP).

At the interface between numerical development, structural mechanics and high-performance computing, this work will enable the student to develop skills in advanced numerical simulation, critical analysis of results and scientific verification, while contributing to research that may lead to a publication.

References

[1] The MFEM/MGIS solver: Overview and applications to large-scale simulations at mesoscale. CSMA 2026 17ème colloque national en calcul des structures. Giens, France, Mai 2026.
<https://cea.hal.science/cea-05506207>

[2] MFEM/MGIS, a HPC mini-application targeting nonlinear thermo-mechanical simulations of nuclear fuels at mesoscale. Journal of Open Source Software.2025
<https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.07719>

[3] MANTA: an industrial-strength open-source high performance explicit and implicit multi-physics solver. CSMA 2024 16ème colloque national en calcul des structures. Giens, France, Mai 2024.
<https://hal.science/hal-04610968>

■ Formation souhaitée :

- Master's degree (M2) in solid mechanics simulation
- Third year of an engineering degree

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Gradient damage models, MFEM/MGIS, Manta, MFront

■ Mots clés :

Numerical simulation
Finite elements

■ Possibilité de thèse :

No – the candidate may apply for the various PhD positions offered by the laboratory

■ Contact :

HELPER Thomas
thomas.helfer@cea.fr



Trains de Tenseurs Quantiques pour la simulation multiéchelle

DEC/SESC/LMCP

L'objectif de ce stage est de mettre en place et d'évaluer des algorithmes numériques de type « Trains de Tenseurs Quantiques » pour la simulation d'équations aux dérivées partielles multiéchelles.

Contexte La méthode des Trains de Tenseurs Quantiques (QTT) est une technique algorithmique basée sur une analogie avec les qubits d'un ordinateur quantique [1, 2] –mais fonctionnant sur un ordinateur classique. Grâce à un mécanisme d'approximation non-linéaire, elle permet de représenter des champs de fonctions avec une très grande finesse. Sous l'impulsion de travaux très récents [1, 3], elle s'est avérée être extrêmement efficace dans la résolution d'Equations aux Dérivées Partielles (EDP), notamment multiéchelles [4].

Ces dernières sont des briques fondamentales pour la modélisation des phénomènes physiques dans les matériaux complexes comme par exemple la diffusion thermique dans un matériau combustible nucléaire. Dans ce cas, le caractère multiéchelle du modèle est une conséquence de l'hétérogénéité du matériau: cette caractéristique rend ardue la simulation numérique par des moyens classiques.

Objectif du stage L'objectif du stage est de participer à l'évaluation des potentialités de la méthode QTT pour résoudre des EDPs multiéchelles, en comparaison avec des solveurs plus classiques Eléments Finis ou basés sur la Transformation de Fourier Rapide (FFT). Cela implique un travail de mise au point de méthodes QTT particulières, et d'expérimentation numérique sur celles-ci.

Profil du candidat Le candidat retenu possèdera un solide bagage en calcul scientifique et en mathématiques appliquées. En outre, des

connaissances en physique quantique et/ou sur l'informatique quantique seront appréciées. L'utilisation d'un langage de programmation est nécessaire.

Ce stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire des Méthodes numériques et des Composants Physiques de PLEIADES* (LMCP).

Ce stage permettra au stagiaire de développer ses compétences en calcul scientifique et en simulation numérique, en contribuant à l'étude d'une méthode algorithmique innovante et à la pointe de la recherche actuelle.

Références

[1] B. Khoromskij. *Tensor Numerical Methods in Scientific Computing*. De Gruyter, 2018.

[2] Hackbusch, W. (2012). *Tensor spaces and numerical tensor calculus* (Vol. 42). Berlin: Springer.

[3] M. Bachmayr. Low-rank tensor methods for partial differential equations. *Acta Numerica*, 32 :1–121, 2023.

[4] M. Josien, A. El Hachimi, I. Ramière, Stable full-field simulation of a multiscale elliptic equation by means of Quantized Tensor Trains. 2026.

* PLEIADES est la plateforme logicielle de simulation du comportement des combustibles du CEA

■ Formation souhaitée :

M2 de calcul scientifique, mathématiques appliquées, ou de physique quantique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Julia, ITensors

■ Mots clés :

Méthodes tensorielles

Equations aux dérivées partielles

Informatique quantique

■ Possibilité de thèse :

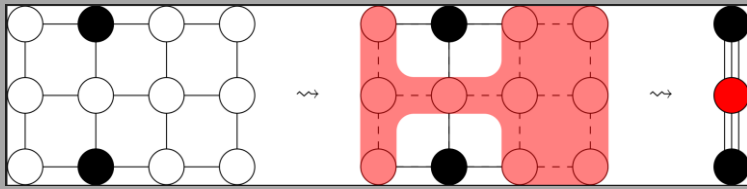
Oui

■ Contact :

JOSIEN Marc

marc.josien@cea.fr





Quantized Tensor Trains for multiscale simulation

DEC/SESC/LMCP

The objective of this internship is to implement and evaluate numerical algorithms based on "Quantized Tensor Trains" for the simulation of multiscale Partial Differential Equations.

Context : The Quantized Tensor Train (QTT) method is an algorithmic technique inspired by the qubits of a quantum computer [1,2] —but designed to run on a classical computer. Through a non-linear approximation mechanism, it enables the representation of function fields with extremely high precision. Driven by very recent research [1, 3], this method has proven to be highly effective in solving Partial Differential Equations (PDEs), particularly multiscale ones [4].

The internship will take place at the CEA Cadarache Centre, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), in the Laboratory for Numerical Methods and Physical Components of PLEIADES* (LMCP).

This internship will enable the student to develop skills in scientific computing and numerical simulation while contributing to the study of an innovative algorithmic method at the forefront of current research.

Multiscale PDEs are fundamental building blocks for modeling physical phenomena in complex materials. For example, consider thermal diffusion in nuclear fuel material. In this case, the multiscale nature of the model arises from the heterogeneity of the material, which makes numerical simulation challenging using classical methods.

Internship Objective : The goal of the internship is to contribute to the evaluation of the QTT method's potential for solving multiscale PDEs, in comparison with more classical solvers such as Finite Element Methods or those based on the Fast Fourier Transform (FFT). This involves developing specific QTT methods and conducting numerical experiments with them.

Candidate Profile : The selected candidate will have a strong background in scientific computing and applied mathematics. Additionally, knowledge of quantum physics and/or quantum computing will be appreciated. Proficiency in a programming language is required.

References

- [1] B. Khoromskij. *Tensor Numerical Methods in Scientific Computing*. De Gruyter, 2018.
- [2] Hackbusch, W. (2012). *Tensor spaces and numerical tensor calculus* (Vol. 42). Berlin: Springer.
- [3] M. Bachmayr. Low-rank tensor methods for partial differential equations. *Acta Numerica*, 32:1–121, 2023.
- [4] M. Josien, A. El Hachimi, I. Ramière, Stable full-field simulation of a multiscale elliptic equation by means of Quantized Tensor Trains. 2026.

*PLEIADES is the CEA's software platform for simulating nuclear fuel behaviour.

■ Formation souhaitée :

- M2 in Scientific Computing, Applied Mathematics or Quantum Computing

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Julia & ITensors

■ Mots clés :

Tensor methods

Partial Differential Equations

Quantum Computing

■ Possibilité de thèse :

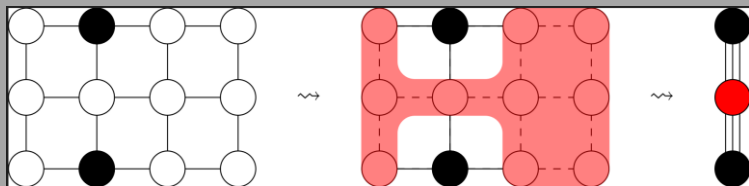
Yes

■ Contact :

JOSIEN Marc

marc.josien@cea.fr





Méthodes de Trains de Tenseurs Quantiques pour le transfert radiatif

DEC/SESC/LMCP

L'objectif de ce stage est de mettre en place et d'évaluer des algorithmes numériques de type « Trains de Tenseurs Quantiques » pour la simulation d'une équation de transfert radiatif.

Contexte La méthode des Trains de Tenseurs Quantiques (QTT) est une technique algorithmique basée sur une analogie avec les qubits d'un ordinateur quantique [1, 2] –mais fonctionnant sur un ordinateur classique. Grâce à un mécanisme d'approximation non-linéaire, elle permet de représenter des champs de fonctions avec une très grande finesse. Cette méthode permet également de contrebalancer la « malédiction de la dimension ». Sous l'impulsion de travaux très récents [1, 3], elle s'est avérée être extrêmement efficace dans la résolution de certaines Equations aux Dérivées Partielles (EDP) [1-4].

Objectif du stage L'objectif du stage est de participer à l'évaluation des potentialités de la méthode QTT pour résoudre l'EDP régissant les phénomènes de transfert radiatif. Même si le modèle employé est a priori assez simple, cette équation est particulièrement difficile à résoudre numériquement car elle est posée dans un espace de dimension assez grande, c'est-à-dire 6 (3 dimensions spatiales, 1 dimension temporelle, et 2 dimensions correspondant à la direction du rayonnement).

Concrètement, à partir d'une base bibliographique, cela implique un travail de mise au point de méthodes QTT particulières, et d'expérimentation numérique sur celles-ci.

Profil du candidat Le candidat retenu possèdera un solide bagage en calcul scientifique et en mathématiques appliquées. En outre, des connaissances ou un intérêt pour la physique quantique et/ou l'informatique quantique seront appréciées. L'utilisation d'un langage de programmation est nécessaire.

Localisation du stage Le stage se déroulera principalement au CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), avec quelques périodes au LMA à Marseille.

Ce stage permettra au stagiaire de développer ses compétences en mathématiques appliquées, en calcul scientifique et en simulation numérique, à travers l'étude d'une méthode algorithmique innovante pour la résolution d'équations aux dérivées partielles en grande dimension. Il constituera également une opportunité de se familiariser avec les méthodes de représentation tensorielle et leurs liens avec les concepts de l'informatique quantique, tout en développant son autonomie dans la conduite d'une démarche de recherche.

Références :

- [1] B. Khoromskij, *Tensor Numerical Methods in Scientific Computing*. De Gruyter, 2018.
- [2] Hackbusch, W. (2012). *Tensor spaces and numerical tensor calculus* (Vol. 42). Berlin: Springer.
- [3] M. Bachmayr. Low-rank tensor methods for partial differential equations. *Acta Numerica*, 32 :1–121, 2023.
- [4] M. Josien, A. El Hachimi, I. Ramière, Stable full-field simulation of a multiscale elliptic equation by means of Quantized Tensor Trains. 2026.

■ Formation souhaitée :

- M2 de calcul scientifique, mathématiques appliquées, de physique quantique, ou calcul quantique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Julia, ITensors

■ Mots clés :

Méthodes tensorielles

Equations aux dérivées partielles

Informatique quantique

■ Possibilité de thèse :

Oui

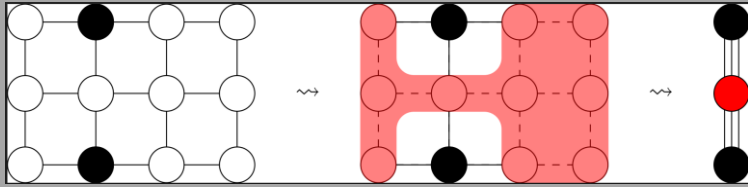
■ Contact :

JOSIEN Marc marc.josien@cea.fr

COTEREAU Régis cottureau@lma.cnrs-mrs.fr

LE TELLIER Romain romain.le-tellier@cea.fr





Quantized Tensor Train Methods for Radiative Transfer

DEC/SESC/LMCP

The aim of this internship is to develop and evaluate numerical algorithms based on Quantized Tensor Trains (QTT) for simulating a radiative transfer equation.

Context The Quantized Tensor Train (QTT) method is an algorithmic technique based on an analogy with the qubits of a quantum computer [1, 2], but it runs on a classical computer. Through a non-linear approximation mechanism, it makes it possible to represent function fields with very high accuracy. The method can also help overcome the “curse of dimensionality”. Following very recent work [1, 3], it has proved extremely effective for solving certain partial differential equations (PDEs) [1–4].

Internship objectives The aim of this internship is to help assess the potential of the QTT method for solving the PDE governing radiative transfer phenomena. Although the model used is relatively simple in principle, this equation is particularly challenging to solve numerically because it is defined in a relatively high-dimensional space, namely six dimensions (three spatial dimensions, one time dimension, and two dimensions corresponding to the direction of radiation).

Based on a literature review, this will involve developing specific QTT methods and conducting numerical experiments using them.

Candidate profile The successful candidate will have a strong background in scientific computing and applied mathematics. Knowledge of, or an interest in, quantum physics and/or quantum computing would be an advantage. Experience with a programming language is required.

Internship location The internship will take place mainly at the CEA Cadarache Centre, within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), with some periods at the LMA in Marseille.

This internship will enable the student to develop skills in applied mathematics, scientific computing and numerical simulation through the study of an innovative algorithmic method for solving high-dimensional partial differential equations. It will also provide an opportunity to become familiar with tensor representation methods and their links to concepts in quantum computing, while developing independence in conducting a research project.

References:

- [1] B. Khoromskij. *Tensor Numerical Methods in Scientific Computing*. De Gruyter, 2018.
- [2] Hackbusch, W. (2012). *Tensor spaces and numerical tensor calculus* (Vol. 42). Berlin: Springer.
- [3] M. Bachmayr. Low-rank tensor methods for partial differential equations. *Acta Numerica*, 32 :1–121, 2023.
- [4] M. Josien, A. El Hachimi, I. Ramière, Stable full-field simulation of a multiscale elliptic equation by means of Quantized Tensor Trains. 2026.

■ Formation souhaitée :

M2 in scientific computing, applied mathematics, quantum physics or quantum computing

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Julia, ITensors

■ Mots clés :

Tensor methods

Partial differential equations

Quantum computing

■ Possibilité de thèse :

Yes

■ Contact :

JOSIEN Marc marc.josien@cea.fr
 COTEREAU Régis cottureau@lma.cnrs-mrs.fr
 LE TELLIER Romain romain.le-tellier@cea.fr





Analyse de composés organiques dans des matrices du nucléaire

DEC / SA3E / LARC

Le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) a pour mission d'améliorer les connaissances sur les combustibles nucléaires. Ce stage s'inscrit dans le cadre de l'application de méthodes pour l'analyse de composés organiques dans des déchets nucléaires.

Contexte et objectifs

La caractérisation des déchets nucléaires constitue une étape essentielle pour leur gestion et leur orientation vers les filières de traitement et de stockage adaptées. Dans ce cadre, la détermination de certains composés organiques présents dans les déchets peut être nécessaire afin de vérifier leur conformité aux spécifications et critères de prise en charge définis pour les différentes filières de gestion des déchets radioactifs.

L'analyse de ces composés dans des matrices de déchets complexes représente toutefois un véritable défi analytique. La préparation des échantillons, en particulier, constitue une étape déterminante pour assurer une extraction efficace des analytes, limiter les effets de matrice et garantir la fiabilité des résultats.

L'objectif de ce stage sera ainsi de contribuer à la mise en place d'une méthode de dosage de composés organiques et son application à des matrices du nucléaire, depuis la préparation des échantillons jusqu'à leur analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse haute résolution (GC-Orbitrap).

Le stage sera réalisé en étroite collaboration avec un sujet de post-doctorat portant sur une problématique complémentaire, au sein d'un laboratoire pluridisciplinaire.

Missions

Le/la stagiaire aura notamment pour missions de :

- Réaliser une étude bibliographique sur les composés organiques d'intérêt et les méthodes analytiques adaptées à leur caractérisation ;
- Développer et optimiser la préparation des échantillons : extraction, purification, et/ou concentration selon les analytes ciblés ;
- Étudier l'influence de la matrice sur les performances de l'analyse ;
- Mettre au point les conditions d'analyse par GC-Orbitrap : conditions chromatographiques et paramètres d'acquisition en spectrométrie de masse haute résolution ;
- Vérifier les performances de la méthode : sélectivité, sensibilité, répétabilité, limites de détection et de quantification, rendement d'extraction, etc. ;
- Appliquer la méthode développée à des échantillons réels ;
- Traiter et interpréter les données obtenues en spectrométrie de masse haute résolution ;
- Présenter les résultats et contribuer à leur valorisation scientifique.

Ce que le stage vous apportera

Ce stage permettra au/à la candidat(e) de développer une expérience complète en chimie analytique, avec notamment :

- Une formation pratique à la GC-HRMS et à la technologie Orbitrap ;
- Une expérience en développement et vérification de méthodes analytiques ;
- La maîtrise d'une démarche expérimentale complète, de la préparation des échantillons jusqu'à l'interprétation des résultats ;
- Des compétences en préparation d'échantillons et extraction de composés organiques dans des matrices complexes ;
- Une expérience en traitement et interprétation de données de spectrométrie de masse haute résolution ;
- L'intégration dans un laboratoire multi-techniques, permettant de découvrir différentes techniques analytiques et de bénéficier de l'expertise de spécialistes de plusieurs domaines ;
- Le développement de l'autonomie, de la rigueur expérimentale et de la capacité à conduire un projet analytique dans sa globalité.

Profil recherché

- Étudiant(e) en Master 2 / dernière année d'école d'ingénieur avec une spécialisation en chimie analytique, chimie, sciences des matériaux ou domaine similaire ;
- Intérêt marqué pour l'expérimentation et l'instrumentation analytique ;
- Des connaissances en chromatographie et/ou spectrométrie de masse seraient appréciées, mais une formation spécifique à la GC-Orbitrap sera proposée ;
- Rigueur, autonomie, curiosité scientifique ;
- Capacité à travailler en équipe et à communiquer ses résultats.

Ce stage se déroulera au centre CEA de Cadarache, au sein de l'Institut de Recherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE), dans le Laboratoire d'Analyses Radiochimiques (LARC). Ce projet de stage se déroulant dans une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, le stagiaire sera familiarisé avec une pratique de travail en laboratoire mettant en œuvre des échantillons radioactifs.

■ Formation souhaitée :

Master 2 Chimie Analytique ou 3^{ème} année d'école d'ingénieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Extraction composés organiques Chromeleon, GC-Orbitrap

■ Mots clés :

Chromatographie en phase gazeuse, spectrométrie de masse, matrices complexes

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

MARIA Emmanuelle

emmanuelle.maria@cea.fr



D é p a r t e m e n t d ' E t u d e s d e s r é a c t e u r s

Le Département d'Etudes 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).



Reactor Studies Department

The Department of Reactor Studies (DER) is an applied research unit with approximately 230 employees (80% of whom are researchers and engineers, and 20% are technicians). The department hosts around 50 PhD students, post-doctoral researchers, and apprentices annually.

The main activities of the DER include:

- Preliminary design of nuclear reactors and innovative energy systems, as well as support for the current industrial nuclear sector (FRAMATOME, EDF, ORANO,...),
- Numerical simulation,
- Operation of the experimental CABRI reactor and preparation for the operation of the future Jules Horowitz research reactor (RJH),
- Experimentation in research reactors
- Innovative nuclear instrumentation,

The DER is divided into four services:

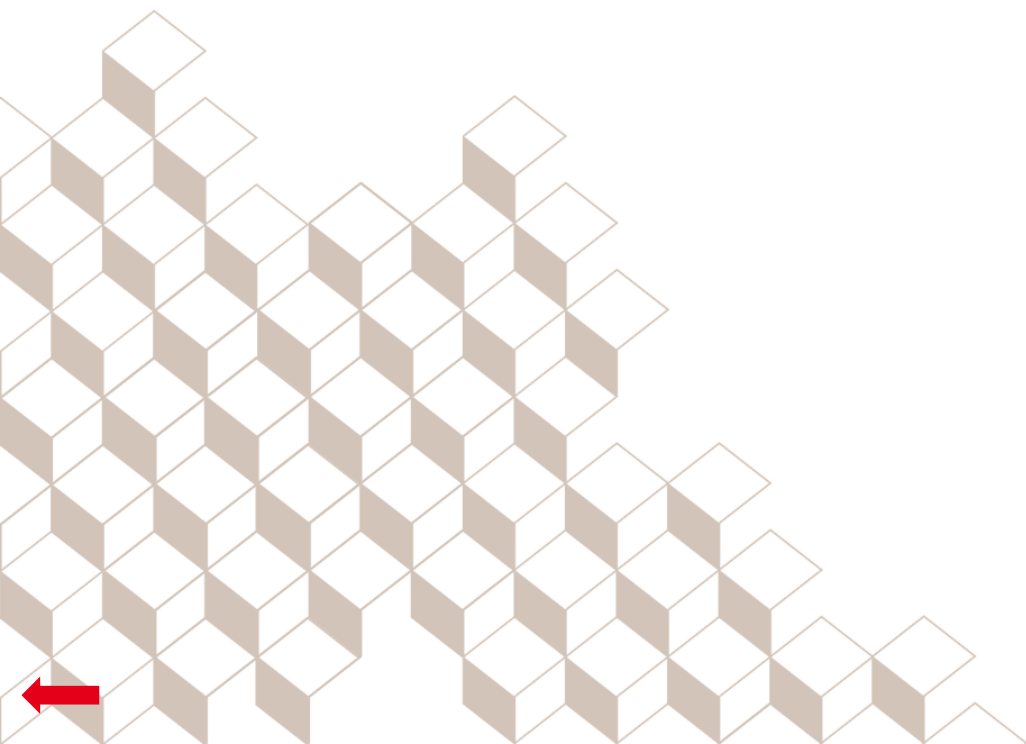
- The Innovative Systems Study Service (SESI),
- The Experimental Physics, Safety Testing, and Instrumentation Service (SPESI),
- The Reactor and Fuel Cycle Physics Service (SPRC),
- The Jules Horowitz Reactor Operations Service (SERJH).

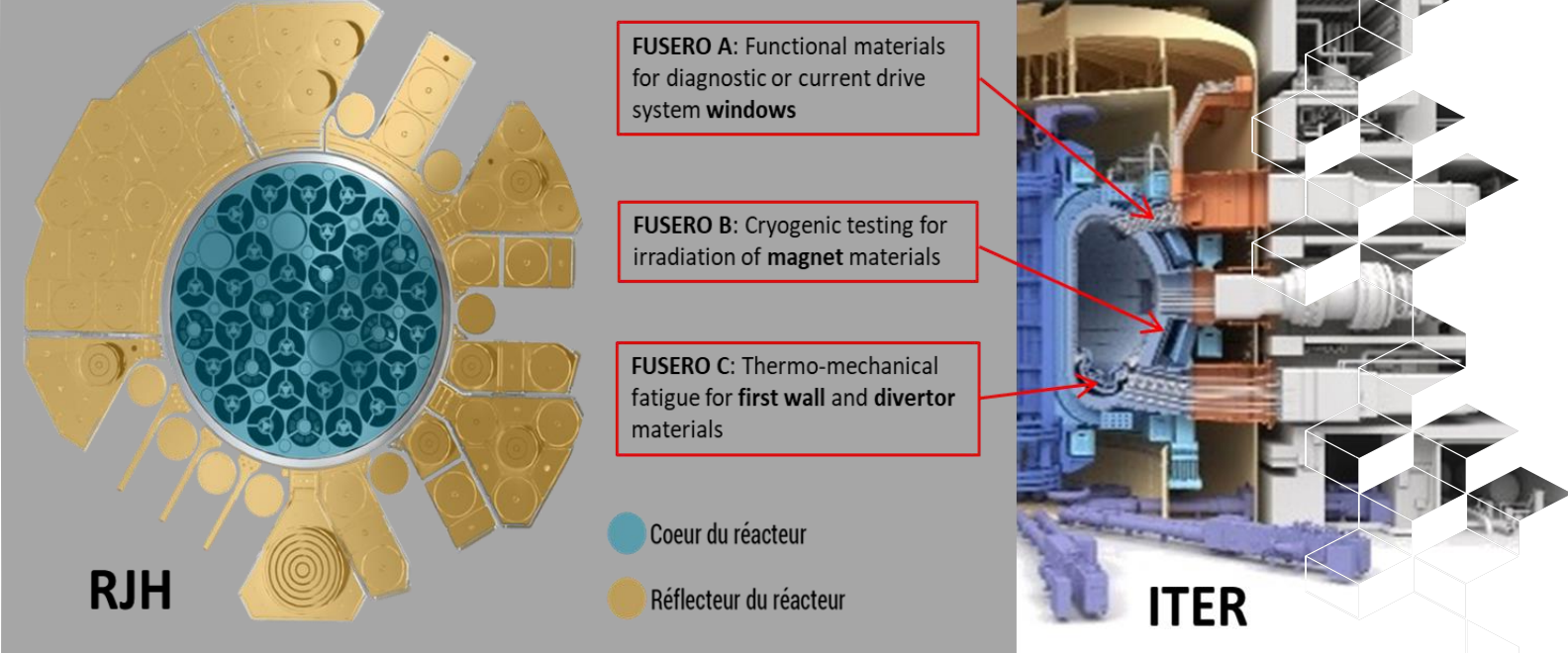


S E R J H

Service exploitation réacteur Jules Horowitz

Jules Horowitz Reactor Operations Unit





Etudes neutroniques et thermo-hydrauliques des dispositifs FUSERO

DER/SERJH/LFSC

Le Réacteur Jules Horowitz (RJH), en cours de construction à Cadarache, est un réacteur expérimental destiné à la recherche sur le comportement des combustibles et des matériaux pour les centrales électronucléaires. Le but y est de réaliser différentes expériences d'irradiation dans des environnements bien contrôlés afin de compléter la plupart du temps les dossiers de sûreté associés à l'utilisation de tels ou tels matériau et/ou combustible dans des réacteurs nucléaires de puissance. Le réacteur RJH produira également des radioéléments pour la médecine nucléaire.

Le projet FUSERO, collaboration bien établie entre UKAEA (Oxford) et le CEA, a pour objectif de répondre aux besoins de la communauté "Fusion" pour réaliser des irradiations expérimentales dans le RJH. Pour y répondre plusieurs études de faisabilités ont déjà été réalisées sur différents concepts de dispositif, tels que l'irradiation à très basses températures, l'irradiation de fenêtre de diagnostic ou la réalisation d'essais de fatigue thermomécanique sous irradiation.

L'objet de ce stage est de réaliser une étude neutronique de faisabilité d'un ou plusieurs dispositifs (cœur ou réflecteur) d'irradiation.

Dans un premier temps, pour prendre en main le code de calcul neutronique TRIPOLI-4®, le stagiaire réalisera des calculs de performances du dispositif placé en réflecteur du réacteur afin d'estimer les niveaux de flux et d'échauffement nucléaire dans l'emplacement pressenti. Ces estimations auront un impact direct sur le design du dit dispositif. On discutera en particulier de la représentativité de telles irradiations. Par la suite, des calculs neutroniques aux limites de fonctionnement devront être réalisés dans une configuration où ce/ces dispositif(s) serai(en)t placé(s) dans le cœur du réacteur. Outre une estimation des performances neutroniques, ces calculs auront un impact direct sur le design, et notamment sur la gestion de la sûreté du dispositif. Suivant l'avancement des études, des calculs thermo hydrauliques seront effectués afin d'en estimer les conséquences.

■ Formation souhaitée :

Ingénieur/Master Bac+5
Spécialité Génie Atomique,
INSTN

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4®

■ Mots clés :

RJH, dispositifs expérimentaux

■ Possibilité de thèse :

non

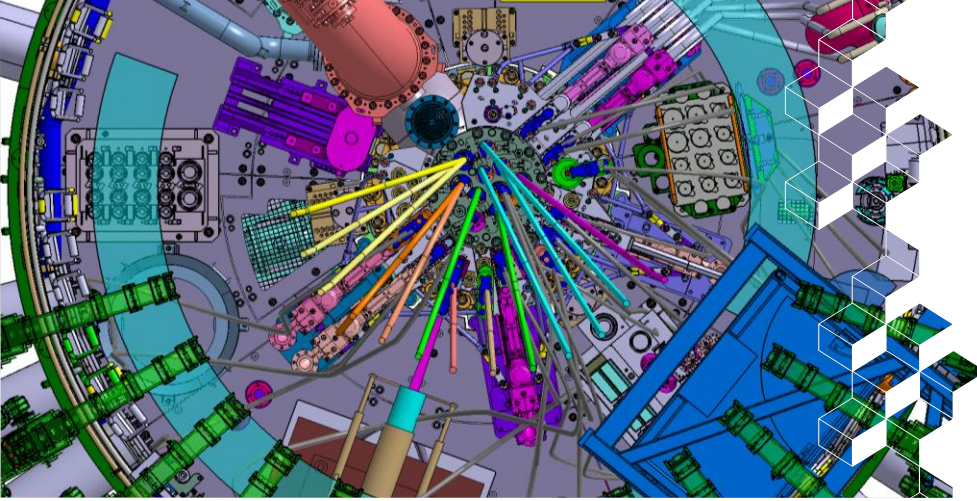
■ Contact :

David Blanchet, Christian Colin

christian.colin@cea.fr

david.blanchet@cea.fr





Caractérisation accélérée des effets en réactivité dans le RJH grâce au machine learning

DER/SERJH/LFSC

L'objectif du stage est d'accélérer la détermination de réactivité du Réacteur Jules Horowitz. Dans cette intention, il s'agit d'identifier et caractériser une bibliothèque de cas représentatifs, dont les résultats détermineront les poids d'un réseau de neurones convolutifs.

Le réacteur d'irradiation technologique Jules Horowitz (RJH), actuellement en construction à Cadarache, est un outil de recherche international unique au monde.

Le cœur du réacteur compte plusieurs alvéoles, dans lesquelles sont accueillis les éléments combustibles, au centre desquels couissent les absorbants neutroniques pour la sûreté et la régulation de puissance. Dans certaines alvéoles, ce sont des dispositifs expérimentaux qui peuvent être intégrés au cœur d'un élément combustible.

Le casier qui abrite les alvéoles des éléments combustibles est aussi équipé d'espaces interéléments dans lesquels sont insérés des absorbants permanents, des témoins d'usure sous flux et la source de démarrage du cœur.

Enfin, le réflecteur du cœur du RJH doit également accueillir des dispositifs expérimentaux, équipés soit d'échantillons de matériaux ou de combustibles soit de systèmes de mesures destinés à la caractérisation physique du cœur.

L'insertion/extraction continue ou discrète, programmée ou accidentelle des barreaux absorbants, comme des autres éléments (absorbants fixes, dispositifs expérimentaux, source), ainsi que l'épuisement local du combustible ou des absorbants introduisent des effets en réactivité qu'il convient de maîtriser

paramétrage de simulation et en ressource de calcul.

L'objectif du stage est d'identifier un ensemble de configurations du cœur du RJH suffisamment distinctes et néanmoins couplées par des similarités, pour qu'un modèle de machine learning puisse effectuer des interpolations réalistes entre ces contours.

Les principales disciplines mises en œuvre sont la neutronique et les méthodes numériques,

Les outils de simulation numérique de l'unité seront à disposition du/de la candidat/e.

Le stage abordera l'étude par une caractérisation numérique à l'aide des outils du laboratoire, ainsi qu'avec des bibliothèques python de machine learning spécialisées (Keras et/ou Tensor Flow). Le/la stagiaire proposera une méthodologie de paramétrage adaptée à l'étude. Les résultats des prédictions du réseau de neurones convolutifs seront justifiés par une analyse physique, qui permettra, le cas échéant, de guider l'interpolation.

Les premiers résultats numériques guideront vers la/les solution/s la/les plus économique/s et robuste/s.

Les résultats pourront être extrapolés à d'autres applications dans le domaine de la maîtrise de puissance.

■ Formation souhaitée :

Ingénieur/Master Bac+5 Option nucléaire, Spécialité Génie Atomique, Physique des réacteurs

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4®

■ Mots clés :

RJH, dispositifs expérimentaux, réactivité, machine learning

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

Guillaume RITTER

Guillaume.ritter@cea.fr

Or la caractérisation individuelle de chaque configuration est couteuse en





Caractérisation neutronique et thermohydraulique de l'élément combustible du RJH

DER/SERJH/LFSC

Objectif: concevoir une méthodologie d'étude globale pour l'élément combustible du RJH

Contexte et enjeux

Le réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH) est en cours de construction sur le site de Cadarache. Il sera principalement dédié à la recherche sur les matériaux et les combustibles destinés à l'industrie électronucléaire. Il servira également à la production de radio-isotopes pour la médecine nucléaire.

Le CEA mène des activités de R&D sur les éléments combustibles (EC) actuels et futurs envisagés pour ce réacteur de recherche. Le Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz (SERJH) a notamment pour mission de caractériser le refroidissement de l'élément combustible dans des conditions de fonctionnement nominales ou dégradées.

Les méthodes de conception actuelles de l'élément combustible sont itératives et reposent sur des chaînages de calculs neutroniques, thermohydrauliques et thermomécaniques. In fine, les choix de conception prennent en compte les contraintes de fabrication, ainsi que les exigences de performance et de sûreté. L'objectif de ce stage est de développer une nouvelle approche de conception multiphysique.

Déroulement

Au sein du Laboratoire Fonctionnement, Sûreté et Calculs (LFSC), le déroulement du stage sera le suivant :

- Caractérisation neutronique de l'élément combustible existant (réactivité, distribution de puissance, performances de flux, taux de combustion, etc.).
- Caractérisation thermohydraulique de cet élément combustible en conditions de fonctionnement normales. Différentes approches seront envisagées (du 1D à la CFD). Le stagiaire devra sélectionner l'approche la plus pertinente. Pour cela il pourra s'appuyer sur les méthodes précédemment développées par le projet RJH pour la qualification de l'élément combustible existant.
- La méthodologie retenue sera ensuite déclinée sur plusieurs familles de concepts innovants envisagés pour l'exploitation future du RJH.

■ Formation souhaitée :

Génie Atomique
Ecole d'ingénieur
Master 2 en Mathématiques
Appliquées, calcul scientifique,
thermohydraulique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Transport Monte-Carlo,
modélisation CFD, scripts
python

■ Mots clés :

RJH, neutronique,
thermohydraulique

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

BOULIN Anne, BLANCHET David

anne.boulin@cea.fr

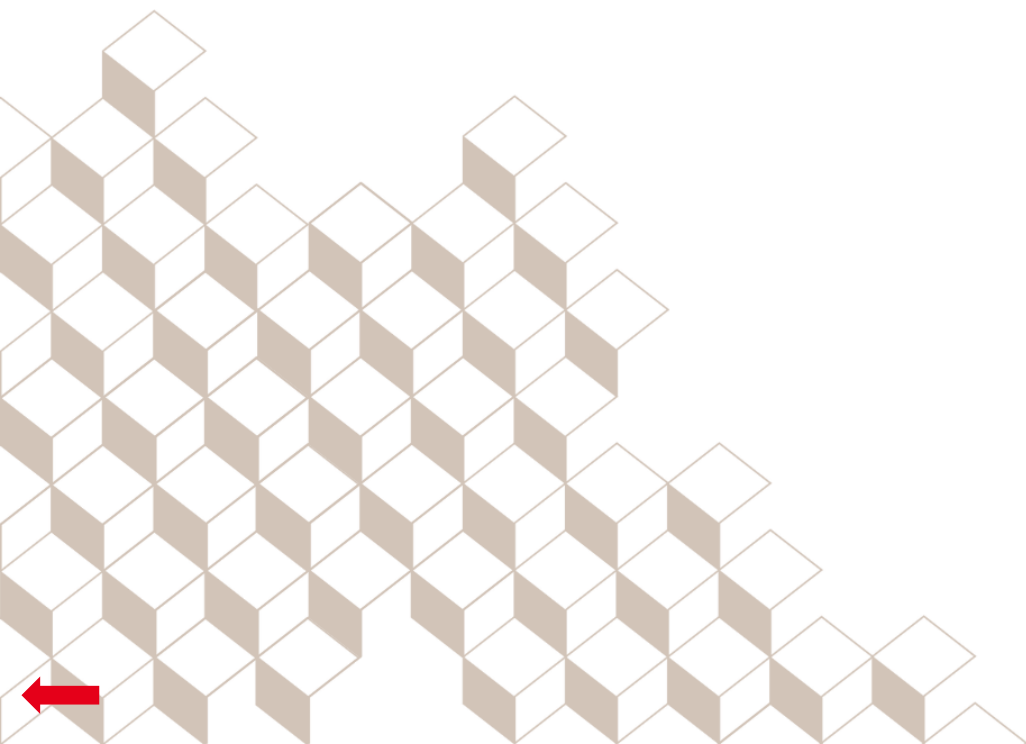
david.blanchet@cea.fr

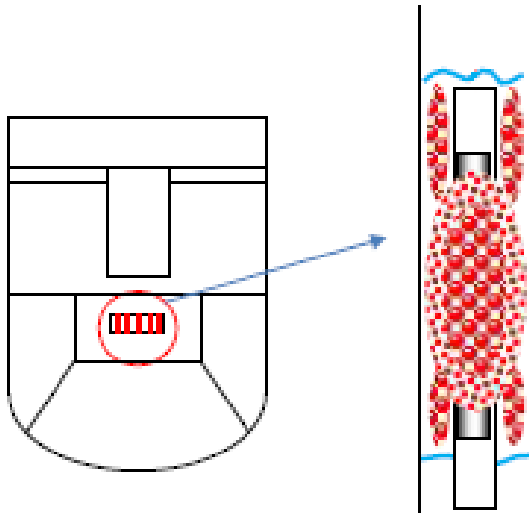


S E S I

Service d'étude
des systèmes
innovants

Innovative Systems Research Unit





Développement et validation d'un outil simplifié, dédié à la conception de RNR-Na, modélisant la fusion du combustible et la rupture de la gaine lors d'une excursion de puissance

DER/SESI/LCOS

Le LCOS (Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes) cherche un.e stagiaire ingénieur.e ayant une formation en génie atomique, énergétique et méthodes numériques pour participer au développement d'un outil simplifié dédié à la prise en compte d'accidents graves dans la conception de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) sont l'un des six concepts de réacteurs dits de quatrième génération (GenIV) retenus par le forum international GIF (GenIV International Forum). C'est cette technologie qui est privilégiée par la France pour mettre en œuvre sa stratégie de fermeture du cycle du combustible d'ici la fin du siècle.

A l'état nominal, ces réacteurs ne fonctionnent pas dans leur configuration la plus critique comme c'est le cas des REP (réacteurs à eau pressurisée). Ainsi, lors d'une séquence accidentelle entraînant une fusion généralisée du cœur, une situation de recriticité est susceptible de se produire engendrant une détente violente de gaz pouvant endommager la cuve principale.

Le stage sera effectué au sein du LCOS (Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes) qui est spécialisé dans la conception et l'analyse de nombreuses technologies de réacteurs, en fonctionnement normal ou accidentel.

Le LCOS développe des outils simplifiés capables de faire des calculs rapides malgré la complexité de la physique en jeu afin d'orienter

les choix de design le plus tôt dans la phase de conception.

Le stage aura pour objectifs de :

- Faire une étude bibliographique afin de s'approprier le sujet et d'acquérir les compétences nécessaires sur les RNR-Na, les accidents graves, et leur modélisation simplifiée,
- Prendre en main le code OCARINa qui simule la thermomécanique, la neutronique, la fusion du combustible et la rupture de la gaine lors d'une excursion de puissance,
- Adapter la modélisation de la dispersion du combustible fondu dans le code OCARINa,
- Faire une étude de sensibilité aux paramètres d'entrées,
- Comparer les résultats d'OCARINa à ceux du code SAS4A sur des configurations pertinentes.

K. Herbreteau, N. Marie, F. Bertrand, J-M. Seiler, P. Rubiolo, Sodium-cooled fast reactor pin model for predicting pin failure during a power excursion, Nuclear Engineering and Design, Volume 335, 2018.

■ Formation souhaitée :

3ème année d'Ecole d'Ingénieur ou Master 2 en génie nucléaire, mécanique des fluides, thermique, méthodes numériques

■ Durée du stage :

6 mois (à partir de février 2027)

■ Méthode/logiciel(s):

Python

■ Mots clés :

RNR-Na, accidents, excursion de puissance, UTOP, modélisation

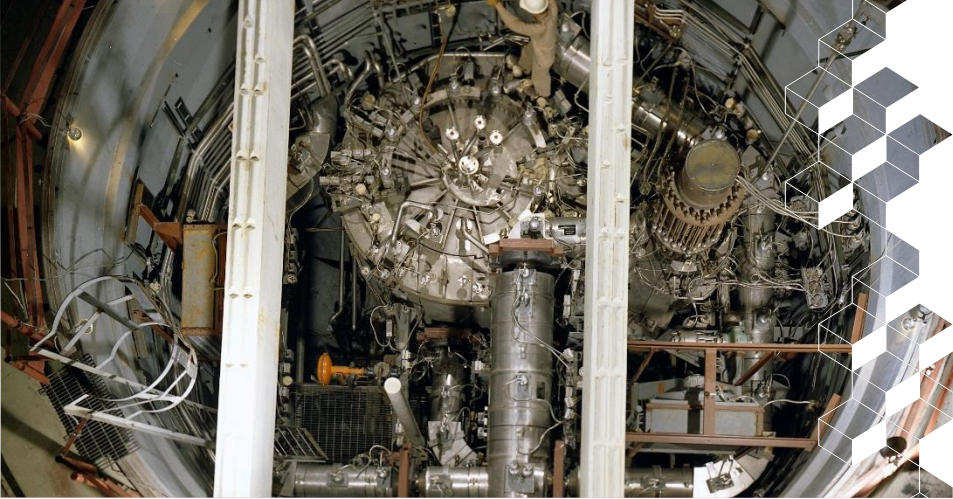
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Mickaël LE BOHEC,
mickael.lebohec@cea.fr





Etude du fonctionnement d'un concept de réacteur à sel fondu incinérateur de déchets nucléaires avec le code CATHARE3

DER/SESI/LCOS

Les réacteurs à sels fondus (RSF) sont un des 6 concepts de réacteur sélectionnés dans le cadre du forum Génération IV. Le projet européen ENDURANCE vise à soutenir le développement technologique des Réacteurs à Sels Fondus en Europe. Dans ce cadre, le CEA participe à un exercice de benchmark sur une série de transitoires de fonctionnement, visant à comparer les capacités des codes de calcul de transitoires à l'échelle système, utilisés par les développeurs de RSF.

Ce stage propose de réaliser des calculs de transitoire du réacteur ARAMIS-P avec le code de thermohydraulique système CATHARE3, développé au CEA.

Le combustible d'un réacteur à sel fondu est un mélange d'halogène, d'alcalino-terreux, de lanthanides et d'actinides. Ce mélange, liquide à très haute température, circule au sein d'une boucle fermée et assure à la fois la fonction de producteur de chaleur et de transport de chaleur. La physique de ce type de réacteur est particulière. D'une part, le déplacement du combustible induit un transport des précurseurs de neutrons retardés hors du cœur ce qui réduit la fraction utile de neutrons retardés. D'autre part la température du sel et la puissance nucléaire sont liées par la contre-réaction de densité du combustible liquide. Enfin, le combustible est dans sa configuration la plus compacte lors du fonctionnement et il peut-être rapidement extrait du cœur par vidange du circuit.

Le CEA étudie depuis 2020 les réacteurs à sel fondu à spectre de neutrons rapides vis-à-vis des services rendus offerts (transmutation des actinides, multi-recyclage du plutonium). Le concept de convertisseur Pu, ARAMIS-P, étudié dans ce stage est issu d'études réalisées dans le cadre d'une collaboration CEA/ORANO.

Le projet ENDURANCE (2024-2028) est un projet européen autour de la technologie des RSF. Son principal objectif est de soutenir l'exploitation sûre et le développement technologique de ces réacteurs en Europe, grâce à l'avancement des connaissances dans différents domaines de la recherche et de l'évaluation de la sûreté, en reliant les besoins des concepteurs de réacteurs et de l'industrie aux capacités des centres de recherche, ainsi qu'aux exigences des régulateurs.

Dans le cadre du projet ENDURANCE, le CEA participe à un exercice de comparaison code-à-code sur une série

de transitoires de fonctionnement.

En 2026, une partie des transitoires du benchmark ENDURANCE a été réalisée dans le cadre d'un stage. L'objet du présent stage est de compléter la modélisation du réacteur et de réaliser les études associées. Des études complémentaires pourront être proposées, comme par exemple, l'utilisation du module 3D de CATHARE3 ou encore l'évaluation de l'impact des incertitudes sur les transitoires pourront être engagées.

Les étapes identifiées ci-dessous seront réalisées :

- Prise en main des jeux de données SERPENT & CATHARE-3 mis en place en 2026 dans le cadre du benchmark.
- Développement par étape des modèles complets du réacteur
- Réalisation des transitoires de fonctionnement.
- Test de modèles (changement de la viscosité du combustible, description individuelles des branches combustibles, modélisation multi-canal du cœur, utilisation du module 3D de CATHARE)

Le stage sera réalisé au sein du DER/SESI à CADARACHE (Conception et études de fonctionnement des RSF) en collaboration avec l'équipe de développement du code CATHARE3 au DM2S.

Les résultats du stage pourrons faire l'objet de publication externe dans le cadre du projet ENDURANCE.

■ Formation souhaitée :

Diplôme d'Ingénieur ou équivalent en physique des réacteurs

Domaines: Neutronique, cinétique des réacteurs, thermohydraulique et fonctionnement

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

CATHARE 3, MOSAICS, SERPENT
Python, C++
Excel, Word, Powerpoint

■ Mots clés :

RSF, PHYSIQUE DES REACTEURS,
FONCTIONNEMENT/SURETE,
SIMULATION
THERMOHYDRAULIQUE

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

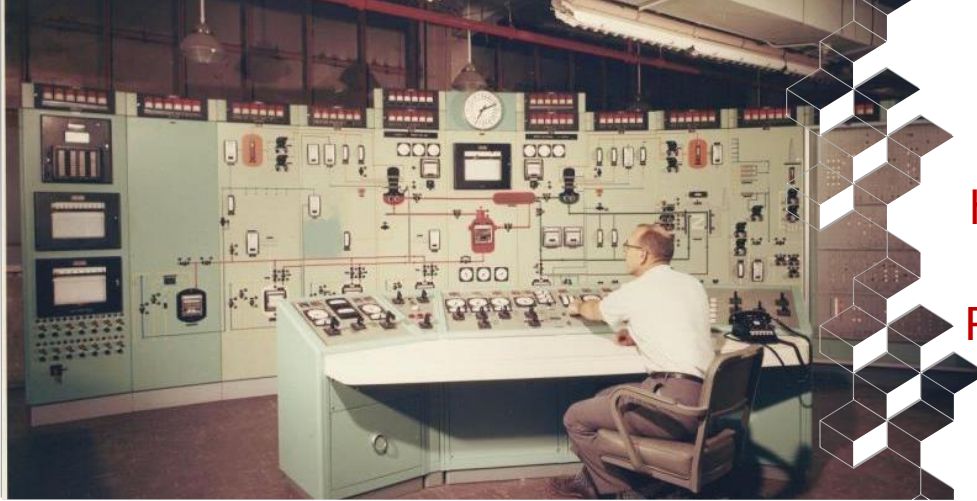
PASCAL Vincent (SESI/LCOS)

vincent.pascal@cea.fr (CADARACHE)

ANDERHUBER Marine
(STM/LTBC)

marine.anderhuber@cea.fr (SACLAY)





Validation of thermal-hydraulics and neutronics coupled Molten Salt Reactor system code with CATHARE3

DER/SESI/LCOS

Molten Salt Reactors (MSR) are one of the six IV-generation reactor concepts selected by the international forum GIF. These reactors have the characteristics of having the nuclear fuel, the coolant or both mixed into a liquid salt. First studied in the United States in the 1960s, they are now the subject of various international projects due to their interesting characteristics regarding their inherent passive safety and fuel utilization.

Different problematics arise regarding the stability of these reactors when operating in natural circulation conditions. The developed computational tools that aims to describe such conditions require an exhaustive validation process with the assistance of system codes such as CATHARE3.

Molten Salt Reactor (MSR) technologies have gained significant interest in the latest years thanks to the potential for a better fuel utilization, enhanced safety features and reduced radioactive waste. However, many unknowns are still present regarding the behavior of such reactors working in different conditions and configurations. In particular, the current internship proposal falls in the context of the analysis of the dynamics of fast spectrum MSRs operating in natural circulation conditions and the assessment of the causes of possible instabilities for these systems.

MSRs are complex non-linear systems in which neutronics and thermal-hydraulics are tightly bounded to each other; for this reason, stability analysis is going to play a significant role in the investigations of such kind of systems. In order to perform stability analysis of these type of systems, it is first necessary to build the necessary computational tools to properly model their behavior.

To do so, a 1D simplified tool simulating the thermal-hydraulic and neutronic time-evolution behavior of the reactor's primary circuit has been developed. The proposed internship is expecting to perform its validation with CATHARE3, the French reference thermal-hydraulics system code used for nuclear safety analysis. CATHARE3 is provided with a specific neutronic capable of performing MSR calculations.

A CATHARE3 input deck of the studied case is going to be provided to the student and is going to be used as reference for the validation process. Expected outcomes of this work consist of finding:

- Similarities and potential discrepancies in the time-evolution behavior of the MSR system described by the Python code with respect to CATHARE3,

- Physical description limits of the simplified tool,
- Possible improvements in the code structure and governing physical laws.

The internship is taking place under the Service d'Etude des Systèmes Innovants (SESI), at the Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS). This laboratory is a multidisciplinary unit supporting the competences in the conceptions, operation and safety of nuclear reactors.

References:

Rosselli, Ruggero & Greiner, Nathan & Anderhuber, Marine & Palfray, Théotime & Caprais, Mathis. (2024). Development of the Molten Salt Reactor Application in French Reference System Code CATHARE3. 1060-1069. 10.13182/PHYSOR24-43484.

Raphaël Pr  a, Philippe Fillion, Laura Matteo, G  d  on Mauger, Anouar Mekkas. CATHARE-3 V2.1: The new industrial version of the CATHARE code. ATH'20 - Advances in Thermal Hydraulics 2020, Oct 2020, Palaiseau, France.

John P. Carter, Richard Christensen, Sujong Yoon, Numerical analysis of dynamic load following response in a natural circulation molten salt power reactor system, Nuclear Engineering and Design, Volume 394, 2022, 111818, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111818>.

■ Formation souhaitée :

Nuclear engineer

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Python, CATHARE

■ Mots clés :

Molten Salt Reactor, CATHARE3, validation, Thermal-hydraulics, Python

■ Possibilité de thèse :

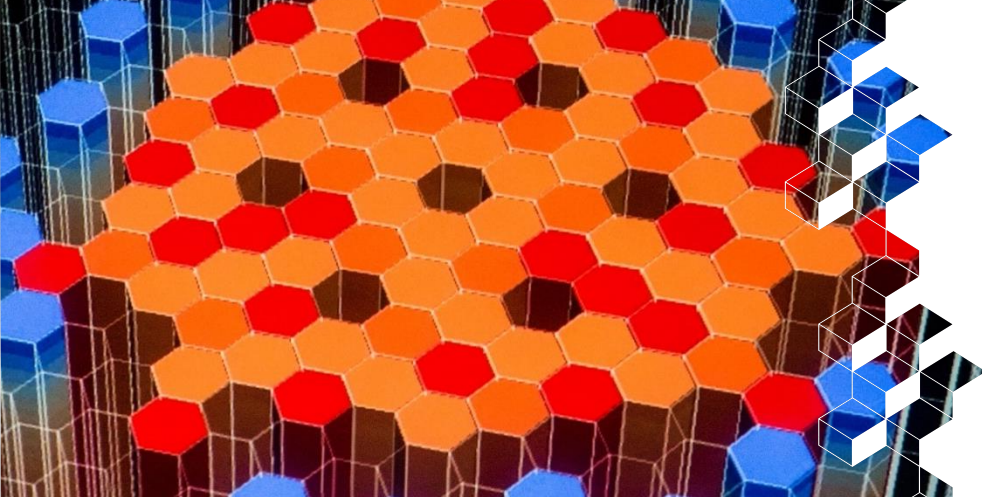
Non

■ Contact :

COLLATUZZO, Alessandro
alessandro.collatuzzo2@cea.fr

MARTIN LOPEZ Elena
Elena.MARTINLOPEZ@cea.fr





Prédimensionnement de la chaudière des réacteurs RNR-Na par l'intégration d'estimateurs de sûreté globaux

DER/SESI/LCOS

Les réacteurs nucléaires de génération IV constituent une nouvelle génération de systèmes nucléaires visant à améliorer la sûreté, la durabilité et la performance économique de l'énergie nucléaire. Parmi les technologies de la génération IV, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) occupent une place importante dans le contexte nucléaire français, notamment grâce à leur capacité à valoriser efficacement les ressources en uranium et à contribuer à la fermeture du cycle du combustible.

L'expérience acquise avec les réacteurs rapides refroidis au sodium (RNR-Na) construits et exploités dans le monde a permis de valider certains choix de conception, tandis que d'autres restent encore ouverts. Dans le contexte de la génération IV, l'évolution des exigences de sûreté pourrait conduire à de nouvelles orientations sur le design, notamment afin d'améliorer le comportement du cœur lors des transitoires accidentels et de renforcer ainsi la sûreté à la conception.

L'évaluation de ces différentes options nécessite des outils de modélisation simplifiés permettant d'estimer rapidement le comportement du cœur, sans recourir systématiquement à des analyses multiphysiques complexes et coûteuses en temps.

Un outil de préconception des RNR-Na est actuellement en cours de développement au CEA. Nommé POSTER (Préconception à l'aide d'Outils Simplifiés Transverses pour l'Etude des RNR-Na), ce projet mobilise plusieurs disciplines et différents laboratoires, notamment dans les domaines de la neutronique, de la thermomécanique et de la thermohydraulique.

Le stage contribuera au développement de la plateforme POSTER, en se focalisant sur le prédimensionnement thermohydraulique de la chaudière du réacteur, à partir du calcul d'estimateurs de sûreté. L'objectif est de contribuer à l'optimisation de la conception du réacteur en intégrant les critères de sûreté en amont.

Le stage s'articulera autour des étapes suivantes :

- Acquisition des connaissances nécessaires à la conception des RNR-Na, avec une attention particulière portée à l'identification et à l'analyse des paramètres clés à prendre en compte lors des premières phases de conception ;
- Définition des objectifs de sûreté et identification des estimateurs pertinents ;
- Implémentation en Python des modules de prédimensionnement de la chaudière et intégration dans la plateforme POSTER ;
- Réalisation d'études visant à identifier les concepts présentant un intérêt particulier et à évaluer leur potentiel d'optimisation du point de vue de la sûreté.

Le stage se déroulera au Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI) au Laboratoire de préConception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS). Ce laboratoire est une unité pluridisciplinaire porteuse de compétences en conception, fonctionnement et sûreté des réacteurs nucléaires, thermohydraulique, énergétique et tech-éco.

Référence :

F. Bertrand et al., Simplified criteria for a comparison of the accidental behaviour of Gen IV nuclear reactors and of PWRs, Nuclear Engineering and Design, 2021.

■ Formation souhaitée :

Ingénieur généraliste, Nucléaire, Méthodes numériques

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Systèmes d'exploitation Linux, Windows ; langage de programmation Python

■ Mots clés :

Réacteur Neutrons Rapides refroidi au sodium (RNRNa); Physique des réacteurs; Préconception

■ Possibilité de thèse :

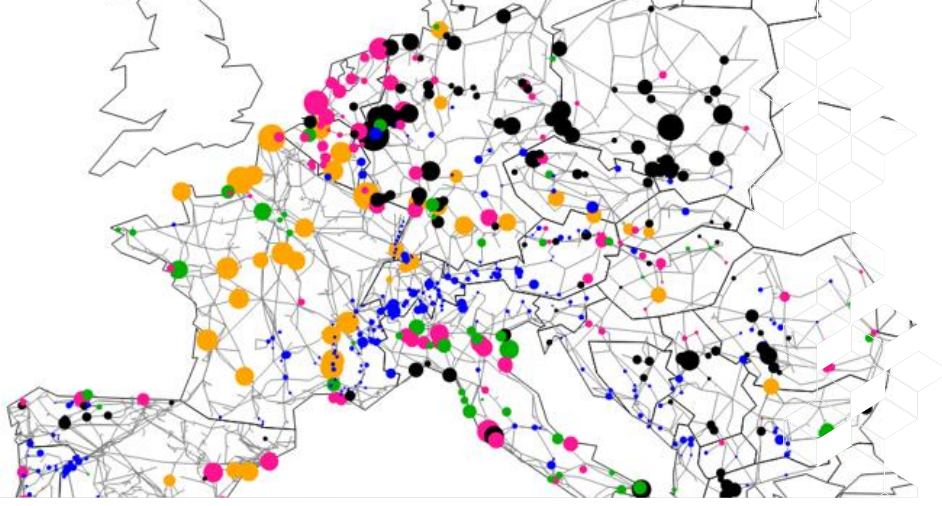
Non

■ Contact :

MARTIN LOPEZ Elena
Elena.MARTINLOPEZ@cea.fr

FORNO Barbara
Barbara.FORNO@cea.fr





Optimisation de la stabilité du réseau électrique sous contraintes physiques dans le calcul d'un mix énergétique

DER/SESI/LCOS

Ce stage a pour but de proposer une formulation puis une méthode de résolution d'un problème d'optimisation de réseau électrique. Ce modèle devra prendre en compte la physique du réseau électrique ainsi que sa stabilité dynamique.

Contexte et objectifs du stage

Les réseaux électriques du monde entier, historiquement centralisés, sont en plein bouleversement avec l'arrivée massive de « petits » producteurs d'énergie renouvelable intermittente (EnRI). Ce changement a notamment un impact sur la stabilité dynamique dû à la réduction de l'inertie dans le système [1]. Les outils actuels, utilisés pour l'optimisation des réseaux électriques, doivent donc être transformés pour prendre en compte les contraintes physiques de celui-ci. L'objectif de ce stage est d'apporter une contribution à la résolution de ce problème.

De nombreuses formulations existent pour étudier les réseaux électriques en fonction de l'objectif de l'étude. Ces différents problèmes sont majoritairement des variantes de l'*Economic Dispatch* (ED), comme par exemple les problèmes de *Unit Commitment* (UC), ou d'*Optimal Power Flow* (OPF) [2]. Ils se distinguent par la précision de la modélisation économique et physique, la classe de problème d'optimisation (LP, MILP, MINLP), la fonction objectif, l'horizon de temps, les variables de décision retenues, etc.

Cependant, aucune de ces variantes ne prend explicitement en compte la stabilité dynamique des réseaux électriques. L'objectif est donc d'enrichir cet aspect de la modélisation. La difficulté principale étant que les mécanismes physiques en lien avec la dynamique des réseaux électriques se déroulent à des échelles de temps (et parfois d'espace) inférieures et inaccessibles aux modèles d'optimisation, ce qui nécessite la création de critères et de contraintes simplifiés et adaptés.

Ce stage s'inscrit dans un projet plus large dont l'objectif est de définir une méthodologie de déploiement de moyens de production et de calcul de mix énergétique prenant en compte les contraintes et besoins des réseaux électriques. Il sera donc amené à évoluer

avec l'avancement de la méthode en cours de développement. Cependant, les sujets d'intérêt suivants sont déjà identifiés :

- Bibliographie, identification des données disponibles et prise en main des outils et modèles mathématiques.
- Choix d'un réseau adapté pour l'étude (France, Guadeloupe, réseau Européen, etc.)
- Proposition de méthodes de prise en compte de la stabilité dynamique du réseau sous forme de contrainte d'un problème d'optimisation.
- Exploration de formulations variées (linéaire, non-linéaire, stochastique, bi-level, etc.) et de méthodes de résolution du problème d'optimisation (exact, méta-heuristique, hybridation avec des GNN ou PINN par exemple) adaptées au cas d'étude retenu.
- Exploration des possibilités de tirages Monte-Carlo pour réaliser des études de fiabilité du réseau.

Cadre de réalisation du stage

Ce stage d'ingénieur est proposé au sein du Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS) du CEA Cadarache, qui a pour mission l'étude des concepts de réacteurs innovants et systèmes hybrides.

Références

[1] L. Pagnier et P. Jacquod, « Inertia location and slow network modes determine disturbance propagation in large-scale power grids », PLOS ONE, vol. 14, no 3, p. e0213550, mars 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0213550.

[2] L. Mones, « A Gentle Introduction to Optimal Power Flow », Invenia Blog. Consulté le: 25 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://invenia.github.io/blog/2021/06/18/opf-intro/>



■ Formation souhaitée :

Master 2 ou école d'ingénieurs avec spécialisation en Recherche Opérationnelle ou Réseaux Electriques.

■ Durée du stage :

6 mois, début souhaité : Février-Mars 2027

■ Méthode/logiciel(s):

Python / PyPSA / Gurobi (ou autre solveur open-source ou commercial)

■ Mots clés :

Réseaux électriques, système dynamique, stabilité, fiabilité, optimisation, machine learning

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

MABILEAU Clement
BOUDOT Charly

Clement.MABILEAU@cea.fr
Charly.BOUDOT@cea.fr





Détermination de la fiabilité d'un système passif de SMR

DER/SESI/LCOS

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique, le développement de technologies nucléaires innovantes suscite un intérêt croissant. Parmi celles-ci, les petits réacteurs modulaires (SMR – Small Modular Reactors) représentent une piste prometteuse, offrant des solutions flexibles, plus sûres et potentiellement mieux adaptées à la production décentralisée d'électricité. Grâce à leur conception compacte et modulaire, les SMR permettent une fabrication en série, une réduction des délais de construction, et une intégration plus aisée dans des environnements variés, y compris des zones isolées ou à faible densité de consommation.

Un des aspects singuliers de ces réacteurs concerne l'intégration de systèmes de sûreté dits "passifs". Contrairement aux systèmes actifs, qui requièrent une alimentation électrique ou une intervention humaine, les systèmes passifs utilisent des principes physiques (gravité, convection naturelle, différence de pression, ...) pour garantir le refroidissement du cœur en cas d'accident. Cette approche vise à renforcer la robustesse intrinsèque des installations nucléaires tout en simplifiant leur architecture de sûreté.

Parmi les questions que posent ces systèmes, apparaît celle de la fiabilité. En effet, la fiabilité des moyens actifs (ou fiabilité matérielle) est un domaine étudié depuis longtemps, au travers d'outils et

méthodologies éprouvées (tests des matériels, arbre de défaillance, ...). Pour les systèmes passifs, de nouvelles méthodologies ont dû être développées : on peut notamment citer REPAS, APSRA, ROAAM+, ainsi que RMPS, développée dans le cadre du 5th European Framework Program, développement auquel le CEA a activement participé. La méthode consiste à bien identifier les missions et les critères de succès du système passif, le modéliser avec un outil de simulation (thermohydraulique système la plupart du temps, avec CATHARE par exemple), identifier les paramètres influents sur le système, leur associer des incertitudes, les propager dans la modélisation, puis compter les échecs/succès du système afin de déterminer sa fiabilité

L'objectif du stage sera d'appliquer la méthode RMPS afin de déterminer la fiabilité du système passif d'évacuation de puissance résiduelle d'un SMR à eau pressurisée.

Dans un premier temps, l'étudiant sera amené à se familiariser avec le système passif d'évacuation de puissance résiduelle. Dans un second temps, il se familiarisera avec le code CATHARE 3 ainsi que la modélisation existante du système passif. Puis il sera amené à modifier la modélisation afin d'appliquer la méthode RMPS, afin de déterminer la fiabilité du système passif. Enfin, des réflexions sur de possibles améliorations de la méthode seront proposés

■ Formation souhaitée :

Formation ingénieur/master avec spécialité en génie énergétique et nucléaire, et formation en mécanique des fluides

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

CATHARE, Linux

■ Mots clés :

SMR, système passif, fiabilité

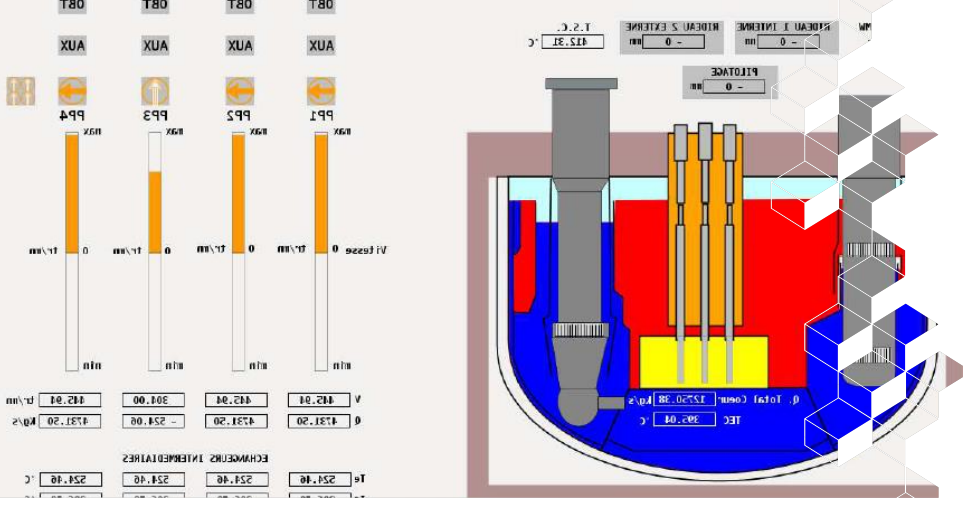
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

GROSJEAN Baptiste
baptiste.grosjean@cea.fr





Benchmark entre les codes CATHARE3 et DYN4G sur un transitoire accidentel de RNR-Na

DER/SESI/LCOS



Dans le domaine nucléaire, des simulateurs de fonctionnement des réacteurs sont développés afin de former les futurs conducteurs de centrales ou bien de mener des études nécessitant une représentation fidèle du système complet (simulateurs d'ingénierie). Derrière l'interface du simulateur, un code de calcul est déployé afin de représenter la physique réacteur complet.

En France, le code CATHARE est généralement utilisé pour les simulateurs de la filière des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), qu'ils soient full scope ou d'ingénierie. En ce qui concerne la filière des réacteurs refroidis au sodium (RNRNa), à ce jour le code DYN4G est implémenté au sein du simulateur d'ingénierie SIRENA développé au CEA Cadarache depuis 2012. DYN4G est un code dédié aux calculs transitoires pour les RNRNa en fonctionnement normal, incidentel ou accidentel (hors conditions diphasiques). Ce code n'a plus d'utilisateur en dehors de son couplage à l'interface de SIRENA et n'est plus maintenu ni développé. C'est pourquoi depuis quelques années maintenant, il est envisagé de le remplacer par CATHARE3 qui est un code de thermo-hydraulique système validé pour plusieurs filières de réacteurs, notamment les RNRNa.

Le stage proposé s'inscrit dans ce cadre. Il s'agit d'apporter sa pierre à l'édifice en ce qui concerne la transition de DYN4G vers CATHARE3 pour le simulateur SIRENA. Des premiers travaux ont été menés par des ingénieurs-chercheurs, deux stagiaires, un thésard et un alternant du DER/SESI depuis 2021 [1-4].

Ce stage de 6 mois s'organisera en deux grandes parties :

1/ Physique du réacteur Superphénix (SPX) et transitoire d'intérêt

- Prise en main du simulateur SIRENA et compréhension de la physique du réacteur SPX (thermo-hydraulique, contre-réactions neutroniques, régulations, interactions entre les différents circuits)
- Déroulement des transitoires de la formation SIRENA

2/ Passage sur CATHARE3

- Prise en main du jeu de données CATHARE existant du réacteur Superphénix
- Modélisation/simulation d'un transitoire accidentel et benchmark avec les résultats issus de DYN4G

Le service qui accueillera le stage (DER/SESI au CEA Cadarache) travaille à la conception de systèmes innovants et aux études de fonctionnement de nombreuses technologies de réacteurs (réacteurs à eau électrogènes, calogènes ou hybrides, de faible et forte puissance, réacteurs au sodium, réacteurs à sels fondus, réacteurs spatiaux...). Ce cadre de travail est propice à l'apprentissage de la physique des réacteurs, la conception, la simulation thermo-hydraulique et la sûreté nucléaire.

[1] L. Matteo « Plan de développement du simulateur SIRENA sur base CATHARE-3 », 2025.

[2] V. Martin, « Contribution au développement d'un simulateur de réacteur au sodium basé sur CATHARE3 », 2025.

[3] V. Audoly, « Modélisation transitoire d'un cycle de Rankine Eau-Vapeur de réacteur nucléaire et étude de solutions de flexibilité », Mémoire de thèse, 2025.

[4] T. Croisette, « Amélioration de la modélisation CATHARE3 du réacteur Superphénix en vue d'une application simulateur et analyse des performances », 2022.

■ Formation souhaitée :

Ingénieur (3^{ème} année) ou Master 2 en énergie nucléaire

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

CATHARE3, SIRENA, linux

■ Mots clés :

Simulateur, Superphénix, thermo-hydraulique système

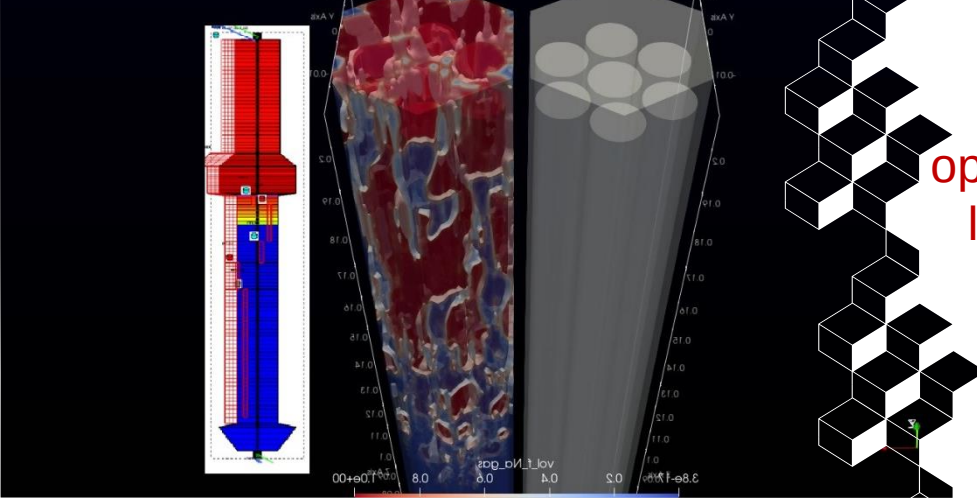
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Barbara FORNO & Laura MATTEO
barbara.forno@cea.fr





Simulation numérique et optimisation avec machine learning de méthodes de remontée d'échelle pour un écoulement Na en ébullition

DER/SES/LEMS

Ce stage porte sur l'optimisation de modèles et de corrélations de changement de phase lors de l'ébullition du sodium.

L'objectif est de réaliser des études CFD dans le processus de remontée d'échelle pour la modélisation de l'ébullition du Sodium dans un réacteur de 4ème génération.

Contexte et objectifs du stage

La technologie de Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium (RNR-Na) de 4ème génération est aujourd'hui retenue dans le processus de fermeture du cycle.

Lors d'un régime transitoire de perte des pompes primaires, un taux de vide élevé se développe dès les très bas titres thermodynamiques, pouvant donner lieu au blocage de l'écoulement dans l'assemblage et ainsi mener dans de très rares cas à une situation d'accident grave.

Les études pour la démonstration de sûreté s'appuient sur des outils de calcul scientifique à différentes échelles, notamment CFD et système. C'est le cas de CATHARE3 développé par le CEA. Dans l'objectif de valider ces codes dans le cas du sodium, on se propose de nouvelles corrélations thermiques de changement de phase du sodium.

Pour la qualification de ces outils, on s'intéresse à mieux comprendre la physique d'ébullition sodium par la réalisation de simulations diphasiques CFD avec l'outil NEPTUNE-CFD, qui est développé par EDF R&D en partenariat avec le CEA, l'IRSN et Framatome. Ces études présentent le double challenge de modélisation d'une géométrie d'assemblage à faible diamètre hydraulique en présence d'un fil à géométrie hélicoïdale et de représentation physique d'un écoulement diphasique basse pression. Des études antérieures ont démontré l'applicabilité de ces modèles en sodium bouillant pour des géométries simplifiées, ouvrant ainsi la voie à une étape ultérieure de qualification des résultats pour des géométries plus représentatives.

Afin d'améliorer la compréhension de

l'ébullition, l'objectif du stage sera d'optimiser une méthode de machine learning de prédiction de transfert de chaleur et de masse à l'interface liquide-vapeur.

Ce stage est amené à évoluer selon l'avancement de la méthode, en cours de développement dans le cadre d'une thèse. Cependant les principales étapes du stage seront les suivantes:

- Bibliographie et tutoriaux des solutions logicielles disponibles au laboratoire, prendre en main les outils et identifier les données disponibles.
- Comprendre les différentes échelles numériques (DNS/RANS/Système) et les différentes démarches pour résoudre le problème.
- Réalisation de maillages et optimisation de ces derniers en accord avec les schémas numériques et les géométries étudiées.
- Simulations CFD selon une progression en terme de difficulté: monophasique puis diphasique d'écoulement sodium bouillant sur des études simples. Utilisation des ressources de calcul avancées (cluster).
- Validation de corrélations contre des solutions de références déterminées au préalable. Comparaison avec les autres corrélations existantes dans NEPTUNE-CFD.

Cadre de réalisation du stage

Ce stage d'ingénieur est proposé au sein du Laboratoire d'Études et de Modélisation des Systèmes (LEMS) du CEA Cadarache, qui a pour mission de réaliser des études détaillées sur les systèmes nucléaires.



■ Formation souhaitée :

Master 2 ou école d'ingénieurs avec spécialisation en mécanique des fluides. CFD

■ Durée du stage :

6 mois, début souhaité : Septembre 2026 ou Février-Mars 2027

■ Méthode/logiciel(s):

NEPTUNE_CFD / Uranie / Python / c++ / Salome / CATHARE3

■ Mots clés :

CFD, simulation, validation, ébullition, optimisation, machine learning

■ Possibilité de thèse :

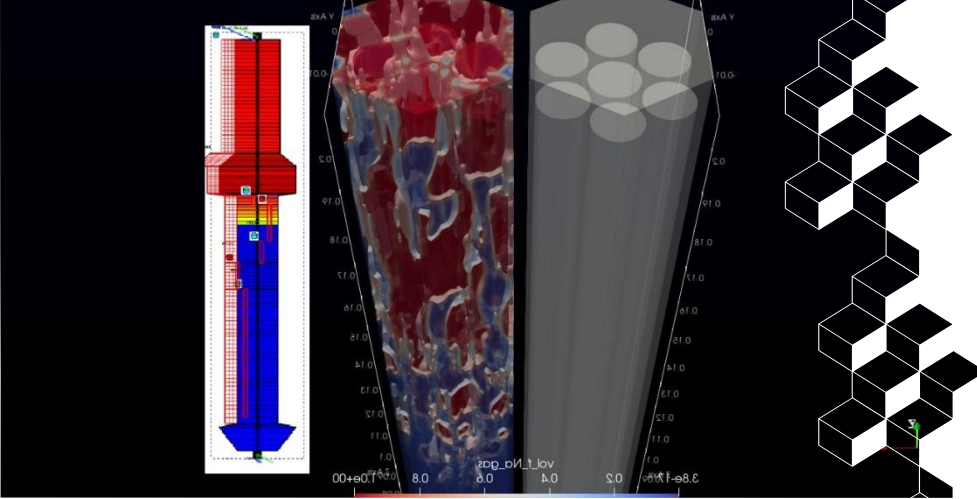
Non

■ Contact :

CARREAU Antoine
PEREZ MANES Jorge

Antoine.CARREAU@cea.fr
Jorge.PEREZMANES@cea.fr





Numerical simulation and upscaling methods optimization using machine learning for a boiling Na flow

DER/SESI/LEMS

This internship focuses on the development of correlations for phase-change phenomena occurring during sodium boiling in a fourth-generation nuclear reactor. The main objective is to apply CFD to support the safety studies at the system scale optimizing via machine learning techniques the sodium boiling modeling.

Context and objectives of the internship

The fourth-generation Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) technology is currently being developed as part of the nuclear fuel cycle closure strategy.

During transient operating conditions involving the loss of primary pumps, a high void fraction may develop at very low vapor qualities. This phenomenon can lead to flow blockage within the fuel assembly and eventually degrade into a severe accident scenario.

Safety assessment studies rely on scientific computing tools operating at different scales, ranging from CFD to system-scale simulations. Among these tools is CATHARE3, developed by the CEA. In order to validate these codes for sodium applications, new thermal correlations for sodium phase change are being developed.

To support the qualification of these tools, the present work focuses on improving the understanding of sodium boiling physics through two-phase CFD simulations using the NEPTUNE-CFD code, developed by EDF R&D in partnership with the CEA, ASNR, and Framatome. These studies involve two major challenges: accurately modeling the complex geometry of fuel assemblies with small hydraulic diameters and helical wire spacers, and physically representing low-pressure two-phase flows.

In this context, the objective of the internship will be to optimize a machine-learning-based methodology for predicting heat and mass transfer at the liquid-vapor interface.

As the methodology is currently under development within an ongoing PhD project, the internship objectives may evolve depending on research progress. Nevertheless, the main stages of the internship are expected to include:

- Literature review and familiarization with the software solutions available in the laboratory, including identification and analysis of available datasets.
- Understanding the different numerical scales (DNS, RANS, and system-scale approaches) and their respective methodologies for addressing the problem.
- CFD simulations of increasing complexity, progressing from single-phase to two-phase sodium boiling flows in simplified configurations, using high-performance computing resources.
- Application of machine learning techniques to bridge the gap between numerical scales and improve the transfer of physical information between high-fidelity simulations and lower-order modeling approaches.
- Validation of the developed correlations against reference solutions and comparison with existing correlations implemented in NEPTUNE-CFD.

Internship framework

This internship is offered within the Laboratoire d'Études et de Modélisation des Systèmes (LEMS) of CEA Cadarache, whose mission is to carry out safety related detailed studies on nuclear systems.



■ Formation souhaitée :

Master 2 or engineering school with specialization in fluid mechanics and CFD

■ Durée du stage :

6 months from September 2026 or from February-March 2027

■ Méthode/logiciel(s):

NEPTUNE_CFD / Uranie / Python / c++ / Salome / CATHARE3

■ Mots clés :

CFD, simulation, validation, boiling, optimization, machine learning

■ Possibilité de thèse :

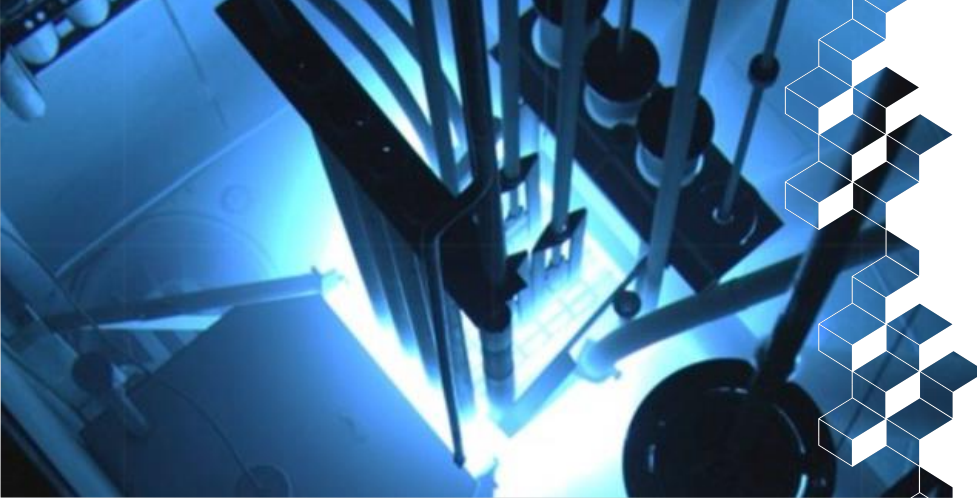
Non

■ Contact :

CARREAU Antoine
PEREZ MANES Jorge

Antoine.CARREAU@cea.fr
Jorge.PEREZMANES@cea.fr





Modélisation du Réacteur Expérimental PULSTAR avec le Code de Thermohydraulique CATHARE3

DER/SESI/LEMS

Stage visant à modéliser le réacteur expérimental PULSTAR à l'aide du code de thermohydraulique CATHARE3.

Contexte

Situé sur le campus de l'université d'État de Caroline du Nord (NCSU) aux États-Unis, PULSTAR est un réacteur nucléaire expérimental dont les caractéristiques technologiques s'apparentent à celles des réacteurs à eau légère, qui composent l'essentiel du parc nucléaire français.

Une instrumentation du cœur de PULSTAR est envisagée pour y mesurer localement le flux neutronique, la température du caloporteur et le débit en différentes zones du cœur. Dans ce cadre, le CEA collabore avec NCSU pour préparer ces futures expériences, afin de valider ses outils de calcul scientifique haute fidélité, combinant codes de neutronique et codes de thermohydraulique.

Objectifs

En parallèle de la préparation des futures expériences, le CEA et NCSU collaborent à la modélisation du réacteur PULSTAR au moyen des codes développés par le CEA. Les premiers travaux ont d'ores et déjà permis une modélisation du cœur avec une résolution à l'échelle de la pastille combustible.

Le stage proposé vise à contribuer à cette démarche en modélisant le

réacteur PULSTAR à l'aide du code de thermohydraulique CATHARE3, puis en simulant divers transitoires accidentels avant d'en analyser les résultats. Enfin, la comparaison de ces résultats avec les modélisations réalisées à NCSU à l'aide du code RELAP5 permettra de valider le modèle développé.

Laboratoire d'accueil

Ce stage se déroulera au sein du Laboratoire d'Études et Modélisations des Systèmes (LEMS) du CEA Cadarache, dont les compétences couvrent plusieurs disciplines : thermohydraulique, physique des accidents graves, énergétique, thermomécanique et statistiques.

Des échanges avec les équipes de NCSU seront possibles pour affiner la caractérisation des éléments du réacteur ainsi que l'analyse des données produites.

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou Ingénieur en Génie Nucléaire ou équivalent

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

CATHARE3, Environnement Linux

■ Mots clés :

Thermohydraulique,
Simulation, CATHARE3

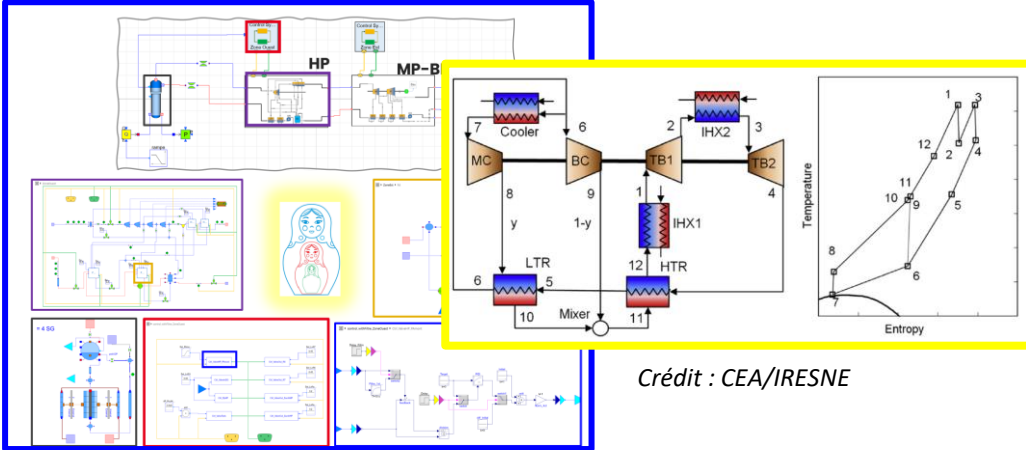
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

DEBOVE Jonathan
jonathan.debove@cea.fr





Crédit : CEA/IRENE

Cycle de conversion d'énergie au CO₂ supercritique : développement d'un modèle MODELICA du compresseur et de son pilotage en flexibilité

Comparaison des architectures d'un cycle Rankine en Eau (MODELICA de l'EPR) et d'un cycle au CO₂ supercritique

DER/SESI/LEMS+LCOS

Le DER/SESI réalise des études de préconception de cycles de conversion d'énergie innovants, au service de la transition énergétique. Un des axes d'étude concerne les cycles mettant en œuvre du CO₂ à l'état supercritique (sCO₂), qui présentent notamment des avantages en terme de compacité en regard du cycle Rankine en eau très largement déployé (voir l'image ci-dessus).

L'objectif du stage est de contribuer au développement d'un modèle MODELICA de cycle au sCO₂ permettant de réaliser des études de pilotage en flexibilité. Il s'agit de mettre à disposition une première brique de modélisation concernant le compresseur, composant opérant à proximité du point critique du fluide où les propriétés physiques et thermodynamiques sont fortement non-linéaires. Cette caractéristique nécessite la mise en place d'approches de modélisation spécifiques par rapport au cas d'un cycle avec fluide idéal suivant l'approximation gaz parfait.

Le programme de stage comprendra typiquement les étapes suivantes :

- Apprentissage pratique du logiciel DYMOLA et du langage MODELICA, par réalisation d'une formation sous forme d'un tutoriel.
- Apprentissage technique sur les cycles au sCO₂, le pilotage et la modélisation du compresseur via revue bibliographique, simulation de cas tests existants et échanges avec les encadrants.
- Analyse des outils déjà développés : modèle de préconception d'un compresseur radial et code de calcul de cartes de performance par approche corrélative.
- Actualisation logicielle de ces travaux pour une application au sCO₂, par développement en PYTHON et/ou DYMOLA. Vérification de la non-régression par réalisation de cas-tests en air. Projection à des conditions de cycles en sCO₂ et comparaison à des résultats d'études de la littérature qui auront été préalablement identifiées.
- Implantation dans DYMOLA des cartes de performance :
 - Lecture des cartes tenant compte des caractéristiques gaz réel.

- Modélisation du pilotage du compresseur par variation de vitesse de rotation.
- Démonstration opérationnelle de la modélisation mise en place par simulation de cas-tests, par exemple mettant en œuvre une variation des conditions de source froide disponible.

Des besoins en terme de calculs CFD de validation ou prospectifs sur des sujets pointus (eg. marge au surge, condensation) seront identifiés.

Selon l'avancement, le développement de la modélisation sera étendu au cas d'un compresseur axial et/ou d'une turbine axiale multi-étagée.

Les qualités attendues du candidat sont :

- Une préoccupation pour les enjeux liés à la décarbonation du secteur énergétique.
- Un goût pour la thermodynamique, la thermohydraulique et la modélisation à l'échelle système.
- L'engagement dans la réalisation des travaux et la rigueur à y associer.

Le stagiaire sera encadré par deux ingénieurs d'expérience sur ces sujets.

Les publications suivantes peuvent être utilement consultées pour situer les sujets de préoccupation de l'équipe d'encadrement ainsi que le type de méthodes déployées :

- <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.05.017>
- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139068>

■ Formation souhaitée :

3^{ème} année d'école d'ingénieurs ou équivalent

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

MODELICA, PYTHON, DYMOLA

■ Mots clés :

Thermodynamique, Thermohydraulique, Machines tournantes, Pilotage

■ Possibilité de thèse :

Oui

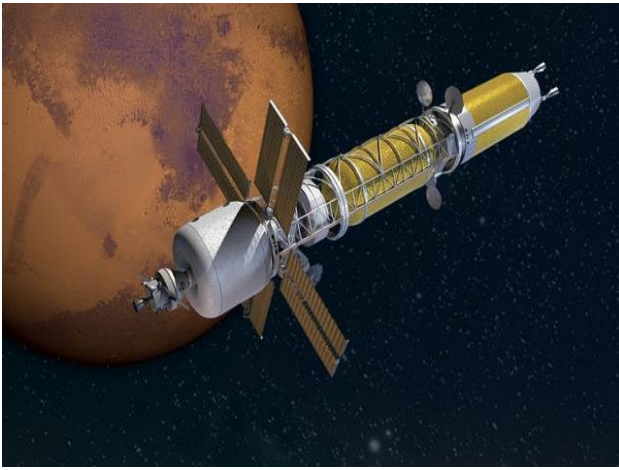
■ Contact :

N. ALPY, C. BOUDOT

nicolas.alpy@cea.fr

charly.boudot@cea.fr





Propulsion nucléaire spatiale : études et optimisation de « concepts of operation » pour des missions habitées vers Mars

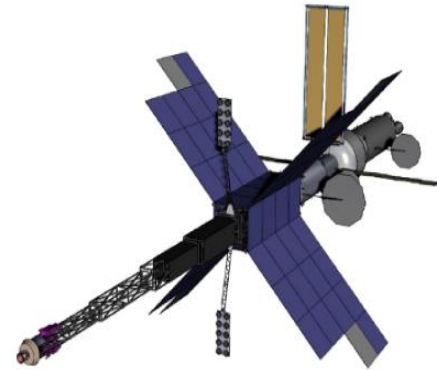
DER/SESI

Le stage proposé a pour objectif d'étudier différents modes de propulsion nucléaire spatiale combinés ou pas à des moteurs-fusées à combustion. Les études porteront sur l'optimisation de l'architecture de la mission, du véhicule spatial et de sa propulsion. Les deltaV et trajectoires optimales ainsi que les concepts of operations (CONOPS) les plus performants pour accomplir des missions humaines vers Mars seront recherchés et analysés et comparés à ceux utilisant la propulsion chimique.

L'agence spatiale Européenne (ESA) a initié en 2022 des projets qui visaient à évaluer des technologies de propulsion spatiale de prochaine génération. Le CEA a ainsi coordonné et mené à bien avec l'appui des industriels ArianeGroup et Framatome le projet ALUMNI, dédié à l'étude préliminaire de la propulsion nucléaire thermique (NTP) pour des missions spatiales et a participé au projet Rocket' Roll consacré à l'étude préliminaire de la propulsion électrique (NEP).

Les deux modes de propulsion ont été évalués sur des missions-types (cas d'usages) définis par l'ESA et la NASA. Des précédentes études réalisées en 2025 et 2026 ont permis de développer, pour la NTP et pour la NEP, des configurations optimales (concepts of operations) pour des missions habitées vers Mars et d'en calculer les trajectoires en tenant compte des pertes gravitaires, de l'étagement du véhicule et des phases de refroidissement des moteurs. Pour la NEP, qui permet seulement d'accéder à de faibles poussées mais à de grandes impulsions spécifiques, la libération de la Terre et la capture lors de l'arrivée vers Mars s'opère avec des moteurs-fusée à combustion. Le travail proposé en 2027 consistera à comparer les différentes combinaisons de types de propulsion possibles (NTP, NTP/NEP, NEP/Combustion). Pour effectuer cette comparaison de manière pertinente, les différentes architectures de missions proposées dans la littérature seront tout d'abord analysées afin d'identifier des trajectoires permettant d'effectuer des comparaisons pertinentes car la NEP et la NTP ne sont pas performantes pour les mêmes configurations de mission. Les masses sèches des différents composants du véhicule seront réévaluées, notamment à l'aune de travaux réalisés au CEA en 2026.

L'objectif final du stage consistera à réaliser des études de mission vers Mars avec les CONOPS optimales en identifiant en particulier les deltaV à fournir pendant chaque manœuvres par chacun des modes de propulsion et en optimisant l'étagement des véhicules considérés. Les critères d'évaluation de performances seront la masse initiale du véhicule à disposer en orbite basse terrestre ainsi que les temps de mission (avec et sans équipage).



■ Formation souhaitée :

Ingénieur aérospatial,
Mécanique spatiale,
Thermodynamique.

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s) :

Calculs analytiques, Python,
outils CEA

■ Mots clés :

Mécanique spatiale Propulsion,
Mars, deltaV, moteurs-fusée,
moteurs ioniques.

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact(s) :

Frédéric BERTRAND
frederic.bertrand@cea.fr



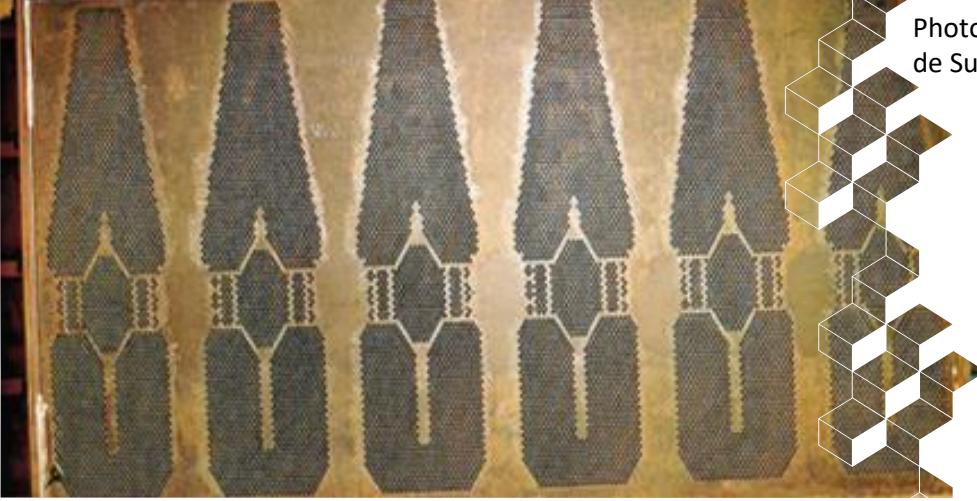


Photo du condenseur
de Superphénix

Modélisation du cycle de conversion d'énergie d'un REP avec CATHARE3

DER/SESI/LCOS



En France, la production d'électricité est en grande partie décarbonée (95% en 2025) et repose majoritairement sur le parc de Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) exploité par EDF (79,6% en 2025). Le cycle de conversion d'énergie de ces réacteurs, de type Rankine à Eau, assure la transformation de la chaleur issue des fissions nucléaires en électricité utilisable sur le réseau. Ce stage a pour objet de modéliser un tel cycle avec l'outil CATHARE3.

Un cycle thermodynamique de type Rankine dont le fluide de travail est de l'eau légère fonctionne en général entre 35 et 500 °C (selon la température de la source chaude) et entre 0,05 et 180 bar. Un diagramme Température-Entropie typique de ces cycles est présenté ci-contre [1].

Ces cycles sont -ou ont été- mis en œuvre dans les centrales nucléaires françaises telles que les REP du parc EDF -ou les anciens Réacteurs à Neutrons Rapides à caloporteur sodium (RNRNa) Phénix et Superphénix- ainsi que dans les centrales thermiques (à charbon ou à gaz). Ils sont donc largement utilisés dans le milieu de l'énergie.

L'architecture de ces cycles telle qu'exploitée en centrale peut être assez complexe, ceci résultant d'un travail sur l'optimisation du rendement électrique. Au cours d'une thèse réalisée au laboratoire entre 2022 et 2025 [1], une version simplifiée du cycle de Rankine à Eau du RNRNa Superphénix a été étudiée avec l'outil CYCLOP puis modélisée avec l'outil CATHARE3 en vue de réaliser in fine des simulations transitoires de cycles innovants.

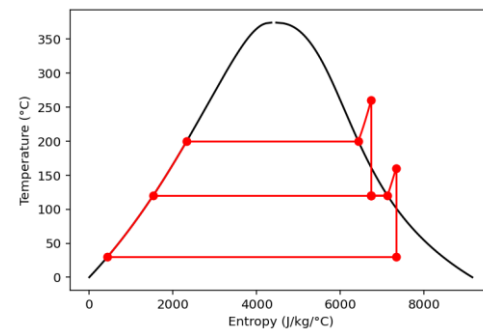
CYCLOP est un outil de thermodynamique stationnaire permettant la conception et l'optimisation de cycles. CATHARE3 est un outil de calcul thermo-hydraulique transitoire destiné initialement aux études de sûreté des Réacteurs à Eau Pressurisée et dont le scope a été progressivement

étendu à d'autres filières de réacteurs et à des applications hors nucléaire.

En se basant sur l'existant, le/la stagiaire aura pour objectif de modéliser un cycle de REP 900 Mwe avec CATHARE3. Une image réaliste de ce cycle existe sous CYCLOP, cependant une approche simplificatrice telle que celle adoptée dans la thèse de V. Audoly [1] devra être mise en œuvre afin de modéliser la physique et la dynamique du cycle au juste niveau. Une fois ce travail réalisé, il s'agira de prendre en main l'outil CATHARE3 et la modélisation du cycle de Superphénix existante afin de l'adapter aux conditions thermodynamiques du cycle du REP 900 MWe et de valider le modèle obtenu.

Le service qui accueillera le stage (DER/SESI au CEA Cadarache) travaille à la conception de systèmes innovants et aux études de fonctionnement de nombreuses technologies de réacteurs (réacteurs à eau électrogènes, caloporteurs ou hybrides, de faible et forte puissance, réacteurs au sodium, réacteurs à sels fondus, réacteurs spatiaux...). Ce cadre de travail est propice à l'apprentissage de la physique des réacteurs à eau, la thermodynamique et la simulation thermo-hydraulique.

[1] V. Audoly, « Modélisation transitoire d'un cycle de Rankine Eau-Vapeur de réacteur nucléaire et étude de solutions de flexibilité », Mémoire de thèse, 2025.



■ Formation souhaitée :

Ingénieur (3^{ème} année) ou
Master 2 en énergie nucléaire

■ Durée du stage :

6 mois (à partir de septembre
2027)

■ Méthode/logiciel(s):

CATHARE3, linux

■ Mots clés :

REP, Cycle de conversion
d'énergie, Modélisation,
Thermo-hydraulique système

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Laura MATTEO

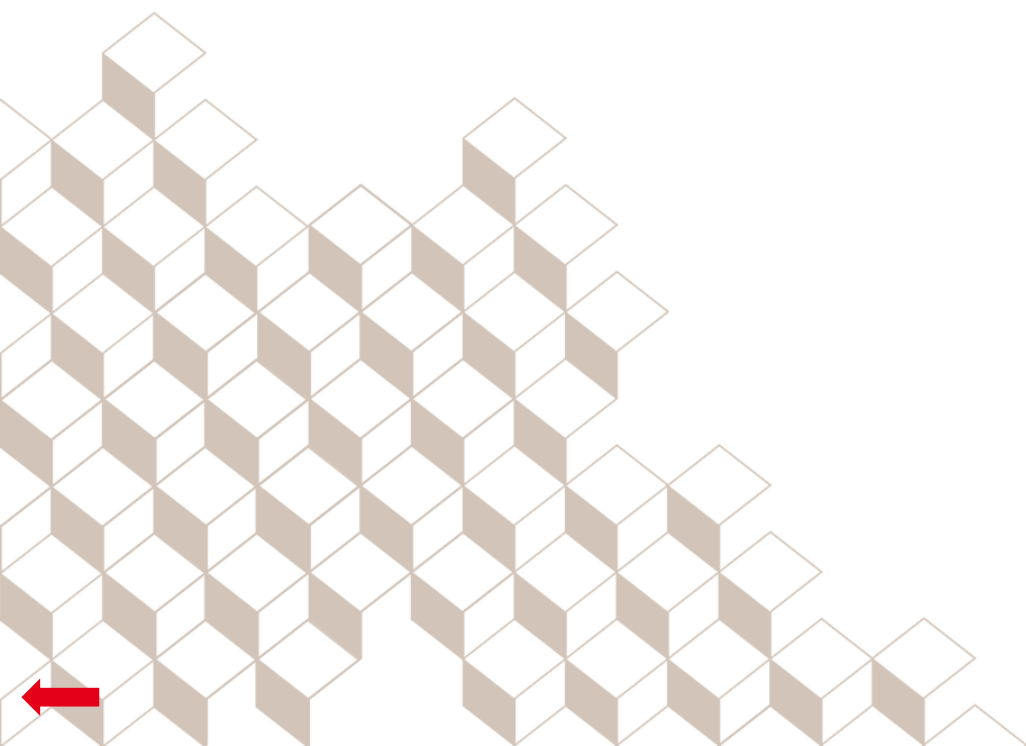
laura.matteo@cea.fr

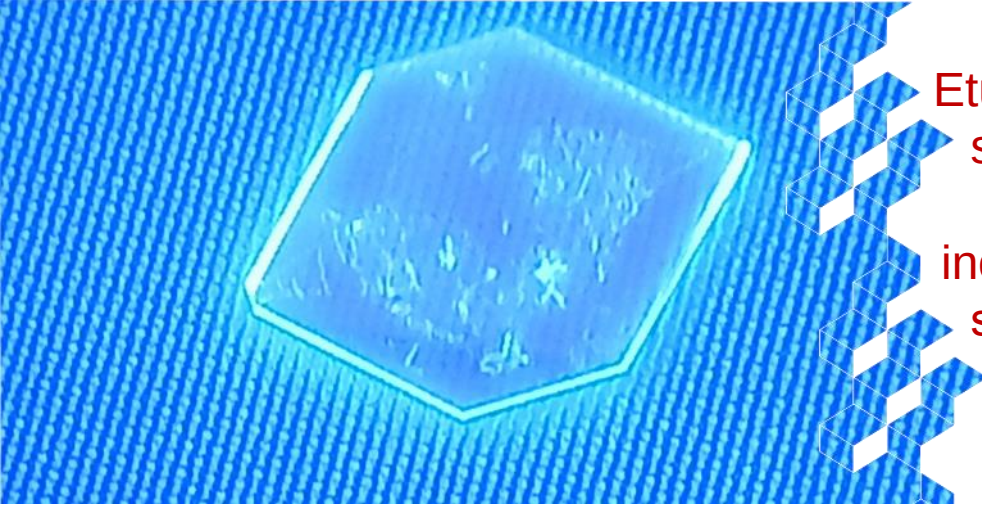


S P E S I

Service de physique
expérimentale,
d'essais en sûreté
et d'instrumentation

*Experimental Physics, Safety Testing
and Instrumentation Unit*





Etude des performances de scintillateurs fibrés à base de pérovskite organique-inorganique pour réaliser la spectrométrie d'un champ neutronique

DER/SPESI/LDCI

Le LDCI (Laboratoire de Dosimétrie, Capteurs et Instrumentation), composé d'une vingtaine de chercheurs et techniciens, développe de l'instrumentation pour les réacteurs nucléaires et plus spécifiquement pour la mesure de flux de neutrons. Les compétences du LDCI couvrent l'intégralité de l'instrumentation nucléaire allant du développement des capteurs à leur intégration en réacteur.

Depuis quelques années, le Laboratoire de Dosimétrie Capteur et Instrumentation (LDCI) du CEA Cadarache développe des détecteurs nucléaires à base de scintillateurs couplés à des fibres optiques pour transporter les signaux lumineux.

Les scintillateurs à base de pérovskites organiques-inorganiques sont des matériaux prometteurs dans le domaine de la détection de neutrons rapides notamment, en raison de leurs compositions chimiques ou leurs dopages. Les travaux déjà réalisés ont montré de très bons résultats pour la mesure de flux neutronique (comptage) et également mis en évidence la possibilité de réaliser des mesures de spectrométrie (énergie).

Dans le cadre de ce stage, l'objectif principal sera d'effectuer une étude approfondie des performances des scintillateurs à base de pérovskite spécifiquement pour réaliser la spectrométrie d'un champ neutronique.

Le stagiaire sera impliqué dans les tâches suivantes :

- Revue de la littérature : Compléter la bibliographie sur l'utilisation des Pérovskites pour la détection des neutrons. S'appropriier les méthodes de reconstruction de spectres d'énergie de neutrons avec des scintillateurs.
- Réaliser des simulations avec

GEANT4 ou FLUKA pour étudier finement l'interaction des neutrons dans le détecteur. Quantifier l'influence de l'échappement des protons de recul. Simuler une matrice de réponse du détecteur.

- Mener une expérience de détection de neutrons en utilisant des scintillateurs pérovskites fabriqués par le CEA LITEN. Irradiation avec des neutrons mono-énergétiques ou mesure de temps de vol.
- Analyser les données expérimentales et interpréter les résultats obtenus. Comparaison des résultats avec des données simulées pour tenter de remonter à un spectre d'énergie des neutrons.

Ce stage offre une excellente opportunité d'acquérir une expérience pratique dans le domaine de la détection de neutrons en utilisant des scintillateurs à base de pérovskite. Les résultats obtenus pourraient avoir un impact significatif sur le développement de nouvelles technologies de détection de particules et ouvrir des perspectives pour des applications pratiques dans des domaines tels que l'instrumentation nucléaire.

■ Formation souhaitée :
Ingénieur 3^{ème} année / Master 2

■ Durée du stage :
4-6 mois

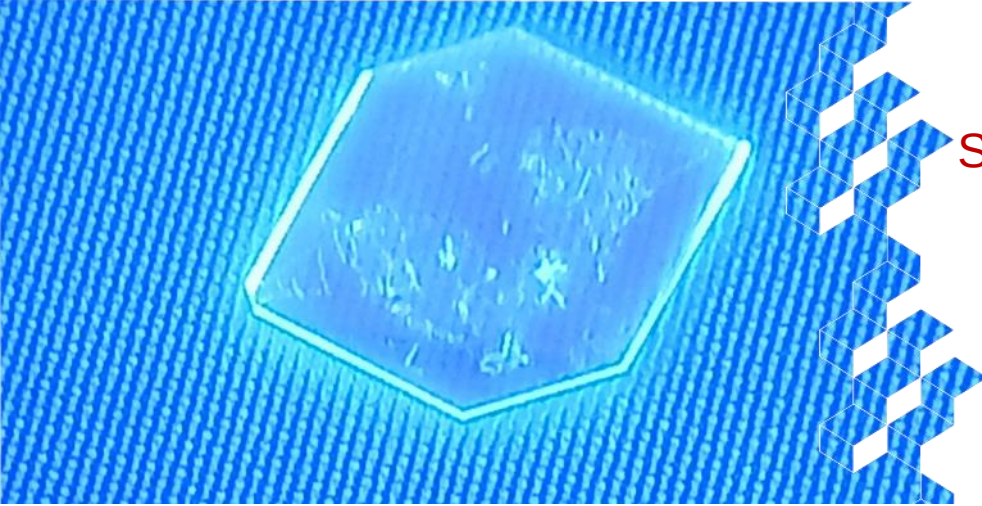
■ Méthode/logiciel(s):
GEANT 4 / FLUKA

■ Mots clés :
Instrumentation, scintillateur, fibre optique, neutron

■ Possibilité de thèse :
Oui

■ Contact :
David Tisseur, Olivier Llido
David.tisseur@cea.fr
Olivier.llido@cea.fr





Study of the performance of organic-inorganic perovskite-based fiber scintillators for neutron field spectrometry

DER/SPESI/LDCI

The LDCI (Laboratory of Dosimetry, Sensors, and Instrumentation), composed of about twenty researchers and technicians, develops instrumentation for nuclear reactors, specifically for measuring neutron flux. The LDCI's expertise covers the entire spectrum of nuclear instrumentation, ranging from sensor development to their integration into reactors.

For several years now, the Dosimetry, Sensors, and Instrumentation Laboratory (LDCI) at CEA Cadarache has been developing nuclear detectors based on scintillators coupled to optical fibers to transmit light signals.

Scintillators based on organic-inorganic perovskites are promising materials in the field of fast neutron detection, particularly due to their chemical compositions or doping. Previous work has shown very good results for neutron flux measurement (counting) and has also demonstrated the possibility of performing spectrometric measurements (energy).

As part of this internship, the main objective will be to conduct an in-depth study of the performance of perovskite-based scintillators specifically for neutron field spectrometry.

The intern will be involved in the following tasks :

- Literature reviewing : Expand the bibliography on the use of perovskites for neutron detection. Learn the methods for reconstructing neutron energy spectra using scintillators.
- Perform simulations using GEANT4 or FLUKA to study the interaction of neutrons in the

detector in detail. Quantify the effect of recoil proton escape. Simulate a detector response matrix.

- Conduct a neutron detection experiment using perovskite scintillators manufactured by CEA LITEN. Irradiation with monoenergetic neutrons or time-of-flight measurements.
- Analyze the experimental data and interpret the results. Compare the results with simulated data to attempt to reconstruct a neutron energy spectrum.

This internship offers an excellent opportunity to gain hands-on experience in the field of neutron detection using perovskite-based scintillators. The results obtained could have a significant impact on the development of new particle detection technologies and open up possibilities for practical applications in fields such as nuclear instrumentation.

■ Formation souhaitée :

Master 2

■ Durée du stage :

4-6 month

■ Méthode/logiciel(s):

GEANT 4 / FLUKA

■ Mots clés :

Instrumentation, scintillator, optical fiber, neutron

■ Possibilité de thèse :

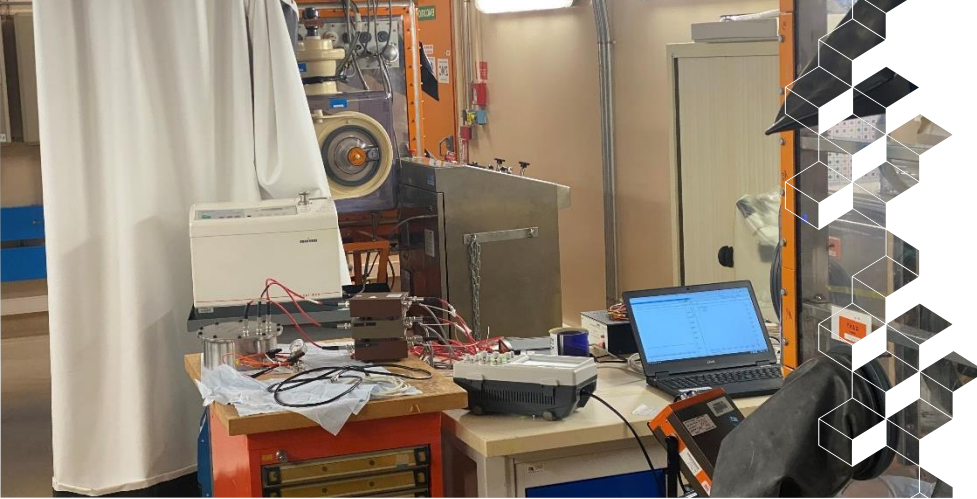
Yes

■ Contact :

David Tisseur, Olivier Llido

David.tisseur@cea.fr
Olivier.llido@cea.fr





Modélisation des chambres à fission pour une utilisation à haut flux neutronique

DER/SPESI/LDCI

Stage de recherche portant sur la modélisation de détecteurs neutroniques pour leur utilisation à haut flux neutronique dans le Réacteur Jules Horowitz

Les réacteurs nucléaires à haut flux neutronique, comme le Réacteur Jules Horowitz (RJH) à Cadarache, nécessitent l'emploi de détecteurs neutroniques fiables, dont la réponse et les incertitudes associées sont estimées de manière robuste. Les chambres à fission, sur l'optimisation et la fiabilisation desquelles le Laboratoire de Dosimétrie Capteur et Instrumentation (LDCI) du CEA Cadarache travaille depuis une vingtaine d'années, sont un type de détecteurs particulièrement adapté lorsqu'on regarde la variance du signal (mode fluctuation), car cette dernière est peu sensible au rayonnement gamma présent dans le champ mixte neutrons/gamma d'un réacteur nucléaire.

Les outils de simulation actuels, notamment le code Chester développé au LDCI, restent insuffisants pour estimer de manière précise le mode fluctuation.

Le stage proposé visera à identifier les raisons de cette insuffisance et à proposer des solutions. Le travail repose sur la compréhension des phénomènes physiques sous-jacents à la formation du signal, par exemple en mettant en œuvre le code GEF (GEneral description of Fission observables) et l'exploitation de données obtenues avec le dispositif expérimental CEA appelé Corex, photographié ici au sein de l'atelier

du LDCI de fabrication des chambres à fission, au sein de l'installation nucléaire de base CHICADE. Ce dispositif hors irradiation permet d'obtenir un catalogue expérimental impulsions issues d'un dépôt alphagène en fonction de la direction de la particule ionisante, ce catalogue étant ensuite directement comparable aux résultats fournis par les outils de simulation.

Les domaines de la physique mis en jeu incluent la physique nucléaire, les interactions rayonnement-matière, le transport des particules chargées, l'électronique d'acquisition et le traitement du signal.

Ce sujet de stage est pensé comme prélude à un travail de thèse dans le laboratoire sur l'étude expérimentale et la modélisation des chambres à fission pour une utilisation à haut flux neutronique.

■ Formation souhaitée :

Ingénieur 3ème année /
Master 2

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

C++, Garfield++, SRIM, GEF,
Root

■ Mots clés :

Interaction rayonnement
matière, simulation, mesures
physiques

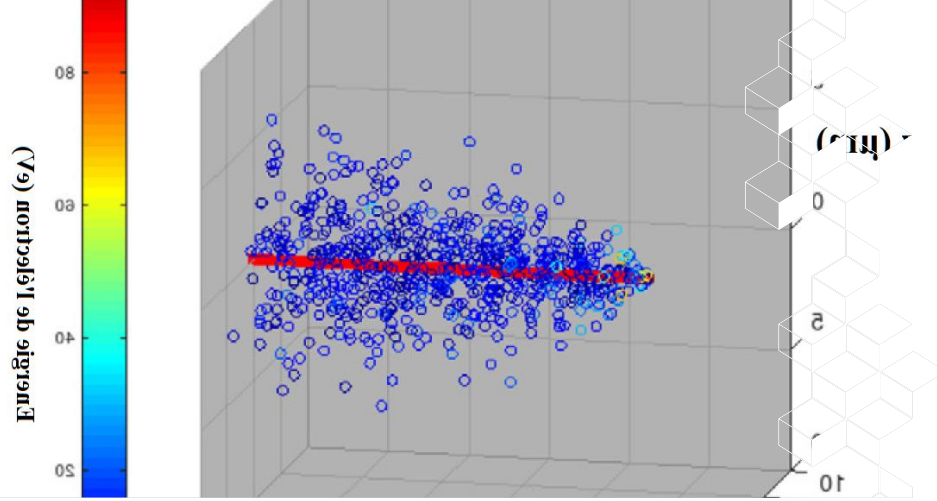
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

FILLIATRE Philippe
philippe.filliatre@cea.fr





Simulation de plasmas nucléaires pour l'instrumentation de RNR-Na

DER/SPESI/LDCI

Dans le cadre de ses activités sur le développement de détecteurs innovants pour la mesure nucléaire, le Laboratoire Capteurs Dosimétrie et Instrumentation développe une instrumentation neutronique basée sur la scintillation de gaz à destination des réacteurs RNR-Na. Au sein de cette action, la construction de modèles de plasma nucléaire est nécessaire pour prédire les signaux de ces capteurs.

Depuis une dizaine d'années, le CEA développe une instrumentation neutronique optique basée sur la scintillation de gaz rare pompé par fragments de fission. Les modèles utilisés pour dimensionner ces détecteurs neutroniques optiques ne sont pas suffisamment efficaces pour obtenir autre chose que des ordres de grandeur. Peu de modèles de plasmas nucléaires existent dans la littérature ; récemment, le modèle SCENA a permis une description précise de la génération d'un plasma nucléaire en exploitant une méthode Monte-Carlo pour transporter les électrons et les relaxer. Cependant, de nombreux phénomènes ne sont pas encore pris en compte par ce modèle, il est donc nécessaire de le compléter et de le valider. Au cours du stage, l'étudiant devra prendre en main le code SCENA

et se familiariser avec les méthodes Monte-Carlo. Il aura en charge de compléter le modèle existant en y intégrant un modèle collisionnel-radiatif et en remplaçant les modèles de collisions ion lourd/gaz de Hansen-Kocbach-Stolterfoht ou de Gryzinski, qui fournissent des spectres d'électrons primaires pas suffisamment précis. Pour cela, on comparera les différents modèles de la littérature aux données expérimentales obtenues par Rykov sur les électrons primaires émis lors de l'interaction de fragments de fission avec de l'argon. Ce sujet de stage initie un travail de thèse qui portera sur l'amélioration des modèles de DNO et leur validation expérimentale, en vue de concevoir un capteur adapté à l'environnement des réacteurs rapides refroidis par sodium.

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou équivalent.
Spécialité : physique des plasmas, instrumentation, génie atomique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Octave, C/C++, Latex

■ Mots clés :

Plasma nucléaire, méthodes Monte Carlo, Modèle collisionnel radiatif

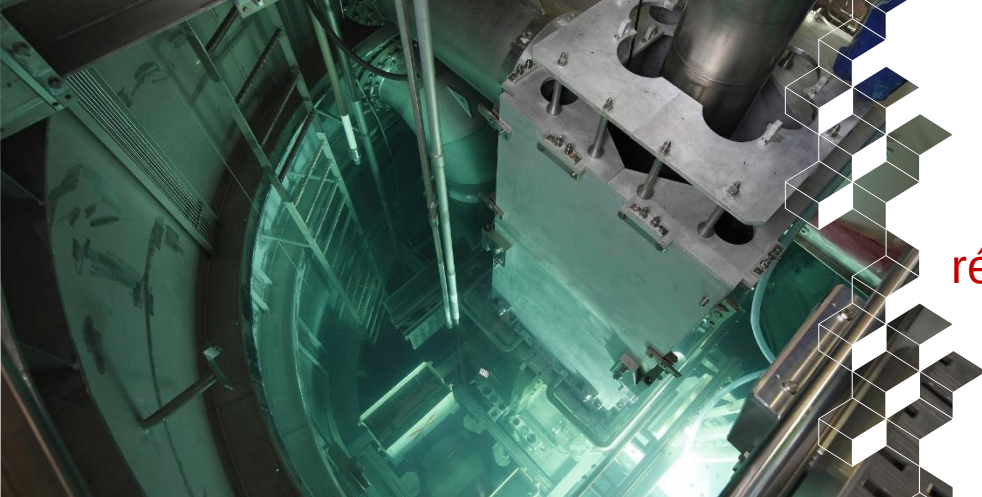
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

de IZARRA Grégoire
gregoire.deizarra@cea.fr





Étude neutronique du réacteur nucléaire CABRI

DER-SPESI-LP2E

Vous souhaitez rejoindre une équipe dynamique et contribuer à des projets innovants dans le domaine du nucléaire?

Nous vous offrons l'opportunité de réaliser un stage de six mois axé sur la modélisation neutronique du réacteur nucléaire CABRI.

Le réacteur CABRI est implanté sur le site du CEA Cadarache. C'est un réacteur expérimental d'études de sûreté qui réalise des excursions de puissance afin d'éprouver la résistance des crayons combustibles et de leur gainage pour des réacteurs à eau sous pression (REP).

Missions

- Se familiariser avec la modélisation TRIPOLI-4 du réacteur CABRI.
- Comparer les performances neutroniques des dernières évolutions du modèle avec les études de référence du réacteur
- Proposer et mettre en place des améliorations pour la modélisation du réacteur.
- Rédiger un rapport faisant le bilan des résultats obtenus.

Profil recherché

- Vous êtes en Master-2 ou en dernière année d'école d'ingénieur dans le domaine du Nucléaire.
- Vous possédez de bonnes compétences en modélisation Monte-Carlo des réacteurs nucléaires.
- Vous possédez de bonnes

compétences en analyse de données et en rédaction de rapport.

- Vous maîtrisez les outils informatiques courants (Word) et les logiciels de traitement de données (Excel, python).
- Vous souhaitez développer vos compétences en neutronique.
- Vous êtes capable de travailler de manière autonome et en équipe.

Lieu de stage

Au sein du Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté (LP2E), rejoignez une équipe dynamique en charge de la préparation, de la réalisation et de l'analyse des essais sur le réacteur expérimental CABRI, exploité par le CEA.

Le LP2E fait partie du Département d'Études des Réacteurs, département de R&D rattaché à l'institut IRESNE qui regroupe les compétences dans les domaines de l'évaluation des filières de réacteurs nucléaires (performances, sûreté nucléaire, économie, déchets), de la physique nucléaire, de la physique des réacteurs et du cycle, ainsi que les compétences pour l'exploitation et la réalisation d'expérimentations en réacteur.

L'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE) est un des trois instituts de la Direction des énergies (DES) du CEA.

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur.

Neutronique, criticité

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Obligatoire : Monte-Carlo neutronique, Excel, Word

Facultatif : Linux, Python

■ Mots clés :

Neutronique, Monte-Carlo

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

Romain Boffy

Romain.boffy@cea.fr





Qualification d'un système de mesure nucléaire pour le réacteur CABRI.

DER/SPESI/LP2E

Vous souhaitez rejoindre une équipe dynamique et contribuer à des projets innovants dans le domaine du nucléaire?

Nous vous offrons l'opportunité de réaliser un stage de six mois axé sur la qualification d'un système de mesure nucléaire.

Cet équipement (dénommé SPECTRON) mesure le courant en provenance de détecteurs nucléaires et sera utilisé sur le réacteur CABRI lors de futures campagnes expérimentales.

Missions

- Réaliser des essais pour évaluer les performances du système.
- Analyser les données recueillies et tracer des graphiques pour mettre en perspective vos résultats.
- Collaborer avec une équipe pluridisciplinaire et contribuer à l'amélioration continue des outils de mesure.
- Rédiger un rapport de qualification.

Profil recherché

- Vous êtes en BUT en Mesure Physique.
- Vous avez un intérêt marqué pour les technologies nucléaires.
- Vous possédez de bonnes compétences en analyse de données et en rédaction de rapports.
- Vous maîtrisez les outils

informatiques courants (Word) et les logiciels de traitement de données (Excel).

- Vous souhaitez développer vos compétences en analyse de données temporelles et le langage de programmation Python.
- Vous êtes capable de travailler de manière autonome et en équipe.

Lieu de stage

Au sein du Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté (LP2E), rejoignez une équipe dynamique en charge de la préparation, de la réalisation et de l'analyse des essais sur le réacteur expérimental CABRI, exploité par le CEA.

Le LP2E fait partie du Département d'Études des Réacteurs, département de R&D rattaché à l'institut IRESNE qui regroupe les compétences dans les domaines de l'évaluation des filières de réacteurs nucléaires (performances, sûreté nucléaire, économie, déchets), de la physique nucléaire, de la physique des réacteurs et du cycle, ainsi que les compétences pour l'exploitation et la réalisation d'expérimentations en réacteur.

L'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Énergie bas carbone (IRESNE) est un des trois instituts de la Direction des énergies (DES) du CEA.

■ Formation souhaitée :

Mesures Physiques (BUT)
Bac + 3 ou supérieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Obligatoire : Excel, Word
Facultatif : environnement Linux, Python

■ Mots clés :

Mesure physique ; mesure de courant ; signal temporel

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

Romain Boffy
Romain.boffy@cea.fr





Développement logiciel pour une baie d'acquisition modulaire en réacteur de recherche

DER/SPESI/LP2E

Dans le cadre de ses activités sur la conception et la réalisation de programmes expérimentaux sur le réacteur CABRI, le Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté met en place une baie d'acquisition modulaire afin de simplifier l'intégration de capteurs expérimentaux dans ses emplacements d'irradiation.

Au sein de l'Institut IRESNE et du Département d'Etudes des Réacteurs, le Service de Physique Expérimentale, d'Essais en Sûreté et d'Instrumentation, regroupe les compétences en exploitation, en physique expérimentale, instrumentation et traitement de données dans le domaine des réacteurs de recherche. Votre stage aura lieu au sein du Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté composé d'une dizaine d'ingénieurs-chercheurs qui ont en charge la spécification, la préparation, la réalisation et l'interprétation d'essais sur le réacteur CABRI.

Ce réacteur est équipé d'emplacements dédiés à l'irradiation, utilisés par divers expérimentateurs pour développer des instruments innovants. Chaque expérience possède une instrumentation spécifique qu'il est nécessaire d'interfacer avec le système d'acquisition du réacteur. Dans le cadre de nos opérations, il est impératif que les instruments puissent être pilotés à distance et synchronisés avec la base de temps du réacteur.

Afin de répondre à ces besoins spécifiques, le LP2E développe une baie d'acquisition synchrone avec les chaînes d'acquisition du réacteur. Ce système a pour objectif de faciliter l'interfaçage avec une large gamme de systèmes de mesure et de contrôler une large famille d'électroniques d'acquisition.

L'objectif du stage est de développer une architecture logicielle unifiée permettant de configurer individuellement chaque système d'acquisition (durée, fréquence d'échantillonnage, déclenchement externe, etc.) via leurs API existantes. Les acquisitions devront être à même de s'adapter aux différents mode de fonctionnement du réacteur, en mode pulse (échantillonnage élevé – faible durée de mesure) ou palier de puissance (échantillonnage faible – longue durée de mesure). Les mesures seront ensuite synchronisées sur une même base de temps que celle des chaînes d'acquisition du réacteur. L'interface et les performances du logiciel doivent répondre aux attentes des expérimentateurs. Chaque module d'acquisition sera progressivement validé avec eux tout au long du développement.

■ Formation souhaitée :

Cursus informatique Bac + 3 minimum

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python - C++/Qt

■ Mots clés :

Acquisition de données, Programmation logicielle, Bases de données.

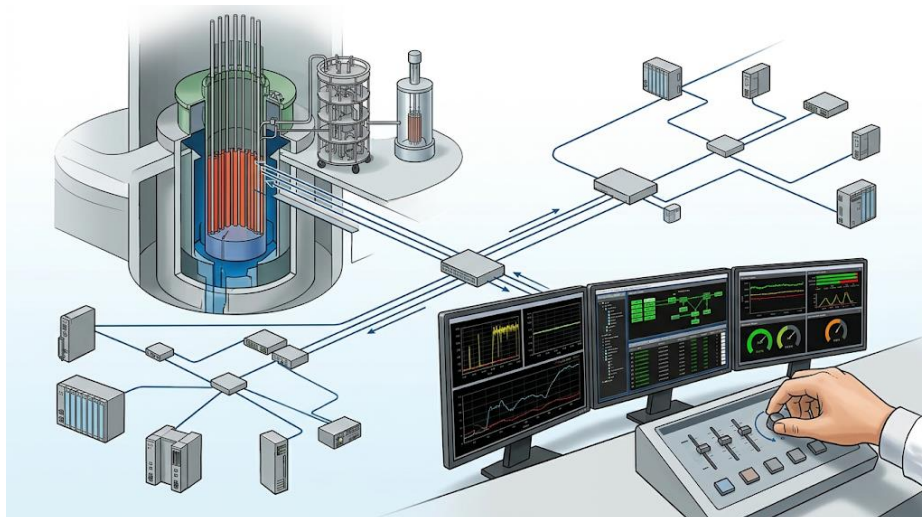
■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

Marc Pouradier Duteil
marc.pouradierduteil@cea.fr
 Gilles Caulier
gilles.caulier@cea.fr
<https://www.linkedin.com/in/gilles-caulier>





Supervision du réseau d'acquisition temps réel du réacteur CABRI

DER/SPESI/LP2E

Ce stage s'inscrit dans le prolongement d'une évolution de l'architecture du réseau d'acquisition temps réel utilisé sur le réacteur nucléaire CABRI du CEA de Cadarache.

Au sein de l'Institut IRESNE et du Département d'Etudes des Réacteurs, le Service de Physique Expérimentale, d'Essais en Sécurité et d'Instrumentation, regroupe les compétences en exploitation, en physique expérimentale, instrumentation et traitement de données dans le domaine des réacteurs de recherche. Votre stage aura lieu au sein du Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté composé d'une dizaine d'ingénieurs-chercheurs qui ont en charge la spécification, la préparation, la réalisation et l'interprétation d'essais sur le réacteur CABRI.

Ce réacteur unique au monde dispose d'une infrastructure d'acquisition temps réel intégrant des chaînes de mesures expérimentales. Dans le cadre de l'évolution de cette infrastructure, le réseau d'acquisition doit intégrer un logiciel de Supervision afin de piloter les applicatifs du contrôle commande de manière efficace en orchestrant le paramétrage et les séquences de mesures pendant les phases d'exploitation du réacteur.

L'objectif est de simplifier et de factoriser les opérations réalisées par les directeurs d'essais qui pilotent les expériences.

Ce stage s'inscrit dans la continuité de l'évolution de la supervision initiée en 2026. Dans ce cadre, vous apporterez des améliorations afin de finaliser le programme principal écrit en C++/Qt et vous modifierez les programmes du contrôle / commande écrits en C/LabView CVI.

Vous intégrerez dans le logiciel des profils de fonctionnement pour paramétrer les chaînes d'acquisition et gérer automatiquement des journaux pour tracer toutes les opérations effectuées pendant les expériences.

Le stage comportera une phase d'appropriation de l'environnement, de développement et de tests en conditions réelles, puis une mise en production avec l'équipe en charge de l'exploitation du réacteur.

■ Formation souhaitée :

Bac + 3 ou supérieur –
Informatique Industrielle

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

C; C++ ; Qt ; Linux, Windows ;
Labview; réseaux, Mqtt, InfluxDB

■ Mots clés :

Acquisitions de données, suivi
temps réel, big data ; ; Contrôle
Commande ; Supervision

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

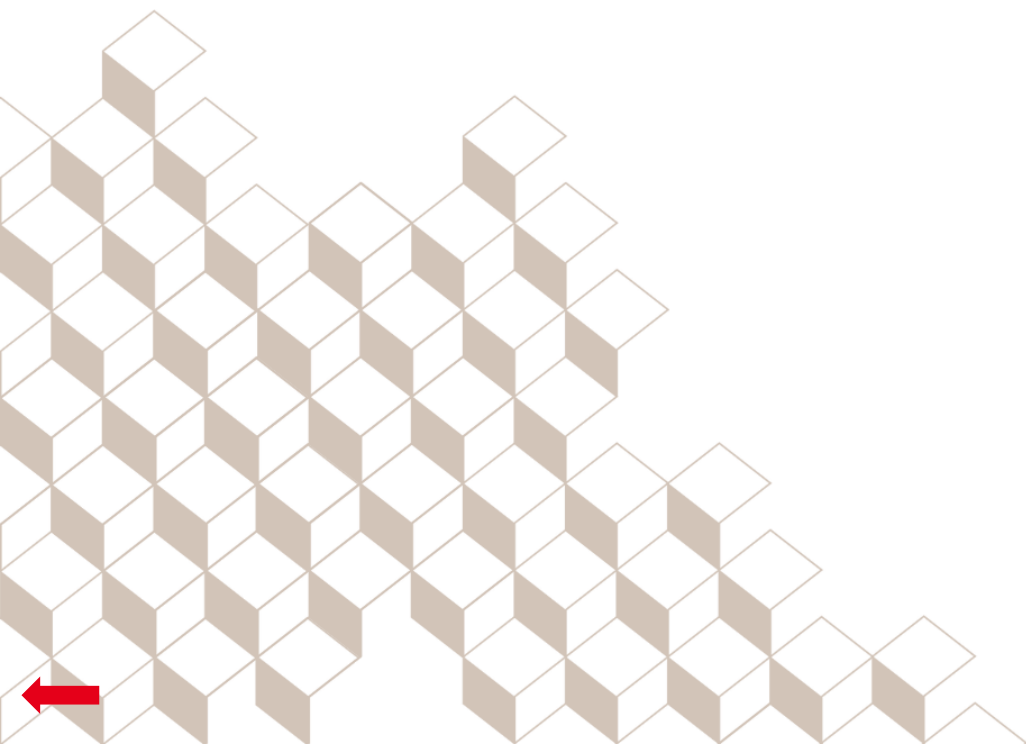
Gilles Caulier
gilles.caulier@cea.fr
<https://www.linkedin.com/in/gilles-caulier>
 Marc Pouradier Duteil
marc.pouradierduteil@cea.fr



S P R C

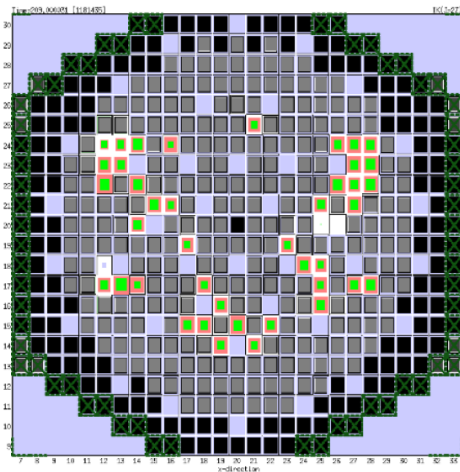
Service de physique
des réacteurs et du
cycle

Reactor and Cycle Physics Unit



Validation du couplage APOLLO3®-SIMMER-V pour le traitement de configurations dégradées au cours d'accidents graves de RNR-Na

DER/SPRC/LEPh



Le stage proposé s'inscrit dans un projet de recherche du CEA sur les réacteurs de génération 4 (GEN IV). Le Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (LMAG) développe une plate-forme de simulation (SEASON) destinée à modéliser les transitoires couplés neutronique/thermohydraulique apparaissant au cours d'hypothétiques scénarios accidentels dans un Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au sodium (RNR-Na). Le Laboratoire d'Etudes Physiques (LEPh), qui encadrera le présent stage, intervient comme soutien au LMAG pour la mise en œuvre du code APOLLO3® dans la plate-forme afin d'améliorer les calculs neutroniques.

Sujet de stage :

Les études d'accidents de réactivité des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium considèrent généralement deux phases :

- une première phase pendant laquelle les assemblages combustibles restent intègres,
- une seconde phase de dégradation de ces assemblages au cours de laquelle plusieurs événements se produisent qui modifient fortement la distribution spatiale des matériaux : fonte des gaines et du combustible, fragmentation du combustible, rupture des tubes hexagonaux, etc...

Les schémas de calcul neutronique classiques (avec calcul préalable des sections efficaces) habituellement utilisés pour modéliser le fonctionnement stationnaire précédent l'accident restent valables lors de la première phase car le nombre de paramètres significatifs reste limité (température combustible et densité sodium principalement). Par contre, lors de la dégradation, du fait des modifications importantes de la géométrie et des compositions, le nombre de paramètres à considérer devient très important et une nouvelle approche doit être envisagée.

A cette fin, un schéma de calcul neutronique innovant (calcul des sections efficaces « à la volée ») a été élaboré en 2025 avec le code de neutronique APOLLO3®, et le couplage informatique avec le code de thermohydraulique SIMMER-V a été réalisé dans la plateforme SEASON en 2026. Ce stage a pour objectif de valider ces calculs couplés APOLLO3®-SIMMER-V.

La première partie du travail consistera à prendre en main la plateforme SEASON pour se familiariser avec les différents codes et le couplage mis en place.

La deuxième partie du travail visera à comparer les résultats APOLLO3®-SIMMER avec ceux obtenus avec le schéma de calcul actuellement utilisé en standard dans SEASON sur un transitoire de type perte de réfrigérant primaire (ULOF).

Au vu des temps de calcul passés dans les différentes étapes, un travail d'optimisation pourra être envisagé dans un troisième temps.

■ Formation souhaitée :

2ème ou 3ème année d'Ecole d'ingénieur, Master 1 ou Master 2. Connaissances en neutronique et physique des réacteurs indispensables

■ Durée du stage :

5 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Word, Excel

■ Mots clés :

Neutronique, RNR sodium, Accidents Graves, APOLLO3, SIMMER

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

VIDAL Jean-François
jean-francois.vidal@cea.fr





Calorimeter at the Clab



Modélisation des expériences de mesure de la puissance résiduelle au CLAB avec les codes APOLLO3 et MENDEL

DER/SPRC/LEPh

La puissance résiduelle est une grandeur de première importance, notamment pour le cycle du combustible. La validation de son estimation par les codes de calcul repose, en autres, sur l'analyse de mesures expérimentales. L'objectif du stage est de modéliser les expériences menées à CLAB avec les codes de nouvelle génération APOLLO3 et MENDEL.

L'estimation de la puissance résiduelle après l'irradiation d'assemblages de combustible repose sur des simulations neutroniques (couplage de l'équation de transport de Boltzmann pour les neutrons et de l'équation de Bateman pour l'évolution des concentrations des isotopes). L'estimation de la puissance résiduelle est d'importance pour les évaluations de sûreté et constitue la donnée d'entrée des études d'échauffement du combustible.

Le futur Outil de Calcul Scientifique (OCS) DARWIN3 aura pour objet l'évaluation de l'inventaire isotopique des combustibles et ses grandeurs dérivées comme la puissance résiduelle ou l'activité. DARWIN3 s'appuiera sur les codes de calculs de nouvelle génération APOLLO3 (pour la modélisation du transport des neutrons au niveau assemblage) et MENDEL (pour le calcul des concentrations isotopiques).

Afin de valider les résultats de puissance résiduelle obtenus avec le futur OCS DARWIN3 sur des cas REP et REB, l'analyse des mesures menées à CLAB est envisagée. En effet, ces mesures sont particulièrement riches en termes de configurations assemblage (REP, REB), temps de refroidissement et taux de combustion.

Le sujet de stage proposé concerne la modélisation des expériences décrites précédemment avec APOLLO3 et MENDEL et la comparaison des résultats obtenus avec l'expérience.

Dans un premier temps, une configuration de type REP sera à traiter avec les différentes interfaces du code APOLLO3 (native, INCA, SIGAR). Ces interfaces présentent des avantages et inconvénients qu'il s'agira d'identifier. Un cas REB sera également à traiter.

L'objectif principal du stage est d'effectuer un premier exercice de comparaison calculs - mesures de la puissance résiduelle pour une application réacteur à eau avec les codes constitutifs du futur OCS DARWIN3.

■ Formation souhaitée :

Stage de fin d'étude (ingénieur, master 2, bac+5)
spé neutronique (Génie Atomique, Phelma,...)

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Linux, APOLLO3, MENDEL

■ Mots clés :

Cycle du combustible,
puissance résiduelle,
validation

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

JABOULAY Jean-Charles
jean-charles.jaboulay@cea.fr





Dynamic pairing in nuclear fission

DER/SPRC/LEPh

Fission is a nuclear reaction widely used in various fields, ranging from energy production to the medical industry and military applications. Although discovered in the first half of the 20th century, it remains a process that is poorly understood from a fundamental standpoint. Indeed, the governing mechanisms are numerous (quantum effects, static and dynamic correlations, interactions, etc.), and obtaining a broad spectrum of experimental data remains a challenge. Consequently, our understanding of fission remains limited, and many questions remain unanswered. In particular, the role of pairing correlations—which impart superfluid characteristics to nuclei—is likely underestimated. This fundamental physics internship focuses on fission modeling and is part of the CEA's civil nuclear data production program.

When measuring the binding energy of nuclei—for instance, along an isotopic chain with fixed proton number (Z)—a difference in binding energy correlated with the parity of the neutron number (N) is observed: nuclei with an even number of neutrons are more strongly bound than their neighbors with an odd number of neutrons. A similar effect is observed along isotonic chains, where (Z) varies while (N) remains fixed. This phenomenon is interpreted as nuclear pairing, a mechanism in which two nucleons form a pair that is more strongly bound than two unpaired nucleons.

With the exception of the ground states of a very limited number of nuclei, namely doubly magic nuclei, pairing correlations are essential for a realistic description of nuclei and their associated reactions. This is particularly relevant to nuclear fission, the process by which a heavy nucleus splits into fragments. Theoretically, fission is primarily described using mean-field approaches, in which the fissioning nucleus is modeled at each stage of the process. The nuclear energy is calculated as a function of deformation variables—typically the lowest-order multipole moments describing elongation and asymmetry—thereby generating a two-dimensional surface known as the Potential Energy Surface (PES).

The Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) mean-field theory used to generate these PESs incorporates static pairing correlations between nucleons of the same isospin. This comes at the cost of breaking particle-number symmetry in the HFB state, which consequently contains components with particle numbers different from that of the physical nucleus. Certain pairing correlations—at the beyond the mean-field level—are not described at this

stage. The aim of this internship is to study pairing correlations associated with particle-number fluctuations in HFB states during fission by treating the particle-number fluctuation as an additional PES dimension, thereby generating a new type of fission PES. This approach is motivated by highly promising results [1] demonstrating the relevance of dynamic pairing to spontaneous fission. The work will initially involve identifying the relevant states associated with fission using this additional variable. Subsequently, fission dynamics will be performed on these new PESs to calculate the charge and mass distributions of the primary fragments produced in neutron-induced fission.

This six-month pre-doctoral internship will be carried out at the Physics Studies Laboratory (LEPh) at CEA Cadarache. Access to the CEA Research and Technology Computing Center supercomputer will provide the HPC resources required to carry out the project successfully. A background in theoretical physics—including quantum mechanics and concepts of mean-field theory—is desirable.

[1] R. Rodriguez-Guzman and L. Robledo, Phys. Rev. C 107, 044307 (2023)

■ Formation souhaitée :

Master 2, Quantum theory / Quantum mechanics

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Mean field, Hartree-Fock-Bogoliubov, Generator Coordinate Method

■ Mots clés :

Nuclear theory, fission, superfluidity, pairing correlations

■ Possibilité de thèse :

Yes

■ Contact :

BERNARD Rémi
remi.bernard@cea.fr





Etude de l'impact des données nucléaires sur la caractérisation de l'inventaire isotopique d'un crayon irradié

DER/SPRC/LEPh

Le projet de fermeture du cycle nucléaire vise à réutiliser au maximum la matière fissile dont celle produite par irradiation dans les réacteurs nucléaires. Dans ce contexte, les données nucléaires jouent un rôle clef, en particulier pour les outils de calcul. Ainsi, il est possible de caractériser le contenu d'un crayon de combustible irradié en fonction des conditions d'irradiation, en vue de pouvoir ensuite récupérer et recycler une partie son contenu.

Dans le cadre de ses activités de soutien aux industriels, le CEA fournit des bibliothèques de données nucléaires qui s'inscrivent, entre autres, dans le programme JEFF¹ de la NEA². Ces bibliothèques regroupent des évaluations de données nucléaires parmi lesquelles les données de décroissance, les rendements de fission et les sections efficaces.

L'évaluation de ces données et notamment l'évaluation des rendements de fission, fait partie intégrante de ce programme. Les rendements de fissions caractérisent les probabilités d'obtention d'un noyau à partir de la fission. Cette évaluation est effectuée au Laboratoire d'Etudes de Physique.

Pour pouvoir valider les nouvelles évaluations, il est nécessaire de tester la cohérence des données en les comparant à des expériences menées au préalable. Ainsi, grâce à la détermination du contenu de crayons irradiés dans des réacteurs français, la connaissance fine du cycle d'irradiation et du plan de chargement du réacteur, nous sommes en mesure de tester une nouvelle évaluation de données nucléaires.

Dans le cadre de cette étude, le code de neutronique APOLLO2, développé par le CEA, sera utilisé pour calculer le flux neutronique à

différentes positions des assemblages, permettant ainsi de déterminer la composition des crayons combustibles.

L'objectif de ce stage est donc de venir évaluer l'impact de nouvelles évaluations des rendements de fission sur les concentrations déterminées et de les comparer avec les mesures effectuées sur des crayons de combustibles irradiés issus de réacteurs nucléaires français.

L'étude se concentrera sur les noyaux fissionnants, l'uranium-235 et le plutonium-239, et leurs rendements de fission.

¹JEFF : Joint Evaluated Fission and Fusion library

²NEA : Nuclear Energy Agency faisant partie de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques)

■ Formation souhaitée :

BAC+4/+5

■ Durée du stage :

4 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python/C++

APOLLO2/3

■ Mots clés :

Données nucléaires, rendements de fission, neutronique

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

TEIXEIRA RUA Nemetan

Nemetan.TEIXEIRARUA@cea.fr





Impact study of nuclear data on the isotopic inventory characterization of an irradiated fuel rod

DER/SPRC/LEPh

The nuclear fuel cycle closure project aims to maximize the reuse of fissile material, including that produced by irradiation in nuclear reactors. In this context, nuclear data play a key role, particularly for calculation tools. Thus, it is possible to characterize the content of an irradiated fuel rod based on irradiation conditions, with the aim of subsequently recovering and recycling part of its content.

As part of its support activities for industrial partners, the CEA provides nuclear data libraries, including those under the NEA¹'s JEFF² program. These libraries compile nuclear data evaluations such as decay data, fission yields, and cross-sections.

The evaluation of this data, particularly fission yield evaluations, is a core component of the program. Fission yields characterize the probabilities of obtaining a nucleus from fission. This evaluation is conducted at the Laboratory of Physics Studies.

To validate new evaluations, it is essential to test the consistency of the data by comparing it with previously conducted experiments. By determining the content of irradiated fuel rods from French reactors, along with precise knowledge of the irradiation cycle and reactor loading pattern, we can validate or reject a new nuclear data evaluation.

In this study, the CEA-developed neutronics code APOLLO2 would be used to calculate the neutron flux at different positions in the assemblies, thereby determining the composition of the fuel rods.

The objective of this internship is to assess the impact of new fission yield evaluations on the determined concentrations and compare them

with measurements taken from irradiated fuel rods from French nuclear reactors.

The study will focus on uranium-235 and plutonium-239 nuclei and their fission yields.

¹NEA: Nuclear Energy Agency, part of the OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)

²JEFF: Joint Evaluated Fission and Fusion library

■ Desired schooling:

First or second year of master degree

■ Duration:

4 to 6 months

■ Method/software(s):

Python/C++

APOLLO2/3

■ Keywords:

Nuclear data, fission yields, neutronics

■ Thesis opportunity:

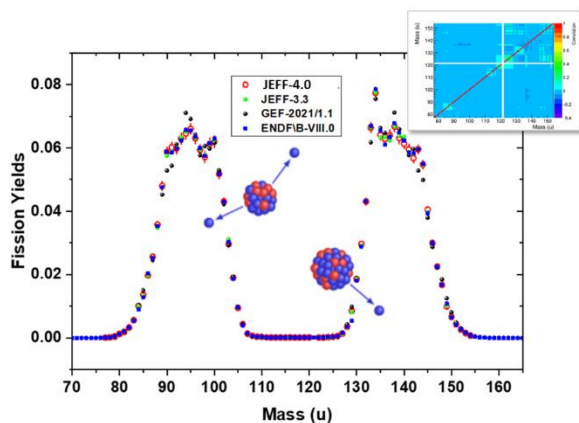
No

■ Contact:

TEIXEIRA RUA Nemetan

Nemetan.TEIXEIRARUA@cea.fr





Etude comparée du processus de fission via l'analyse des réactions :

$^{233,235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$,
 $^{239,241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$
 et $^{241}\text{Am}(n_{\text{th}},f)$

DER/SPRC/LEPh

Les données nucléaires jouent un rôle fondamental dans de nombreuses applications, allant de la modélisation des réacteurs à la sûreté, en passant par les applications médicales et la recherche fondamentale. Parmi elles, les rendements de fission occupent une place centrale car ils permettent de caractériser la distribution des fragments issus de la fission d'un noyau lourd. Afin d'évaluer ces rendements de manière fiable, des outils spécifiques sont développés au CEA, intégrant des approches statistiques et des modèles physiques. Le stage proposé s'inscrit dans une démarche de modernisation et d'enrichissement de ces outils, avec pour objectif final son application dans le cadre de l'évaluation des rendements de fission de l' $^{241}\text{Am}(n_{\text{th}},f)$ qui sera comparé aux quatre noyaux fissionnants majeurs.

Le CEA occupe une position stratégique dans le domaine des données nucléaires, jouant un rôle de premier plan dans leur production, leur évaluation et leur amélioration continue. Ces données constituent un pilier fondamental pour de nombreuses applications : modélisation des réacteurs nucléaires, analyses de sûreté, évaluations de criticité, applications médicales mais, aussi, pour des recherches en physique nucléaire fondamentale. Parmi les données d'intérêt, les rendements de fission revêtent une importance particulière. Ils caractérisent la distribution des fragments produits lors de la fission d'un noyau lourd. Ils sont essentiels tant pour la compréhension fine des mécanismes de fission que pour la modélisation précise des phénomènes physiques intervenant dans les réacteurs.

Le CEA, en partenariat avec des institutions nationales et internationales, mène des campagnes expérimentales pour la mesure de ces rendements de fission. Néanmoins, ces données expérimentales, seules, ne suffisent pas à elles-mêmes pour constituer une base de données nucléaires. Elles doivent être intégrées dans un processus rigoureux d'évaluation, combinant différents types de données expérimentales avec des modèles phénoménologiques. Dans ce contexte, nous avons développé des outils d'évaluation intégrant des approches statistiques sophistiquées pour l'analyse des données et la quantification des incertitudes.

Le stage vise à développer une approche bayésienne tenant compte de l'information apportée par les modèles (prior). Cette évolution vise notamment à permettre son utilisation dans le cadre de l'évaluation des rendements de fission de l' $^{241}\text{Am}(n_{\text{th}},f)$ pour lequel la seule information expérimentale n'est pas suffisante.

L'objectif principal de ce stage est de contribuer à l'amélioration des outils d'évaluation des rendements de fission développés au CEA. Le (la) stagiaire participera notamment à :

- Accroître l'autonomie de l'outil via l'utilisation de modèle de fission comme « prior » à l'analyse statistique;
- Améliorer la qualité de l'outil, tant du point de vue technique que fonctionnel.

En parallèle de ces développements, le (la) stagiaire sera amené(e) à :

- Se familiariser avec les fondements physiques nucléaires et leurs rôles centraux dans l'évaluation des données nucléaires ;
- Appliquer des méthodes d'analyse statistique sur des données expérimentales complexes (traitement des incertitudes et de corrélations expérimentales) pour tester les modèles de fission.

Profil recherché

Les compétences suivantes sont particulièrement souhaitées :

- Intérêt marqué pour les applications nucléaires et les problématiques de modélisation du processus de fission ;
- Maîtrise du langage C++ et des principes de programmation orientée objet ;
- Connaissances de base en analyse statistique ;
- Une aptitude à travailler de manière autonome, ainsi qu'un goût pour l'interdisciplinarité entre physique, modélisation et informatique, seront des atouts majeurs pour la réussite de ce stage.

■ Formation souhaitée :

M2, 3A d'école d'ingénieur avec une spécialisation en physique nucléaire

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

C++, ROOT, Python

■ Mots clés :

Physique nucléaire, Rendements de fission, Analyse statistique, données nucléaires.

■ Possibilité de thèse :

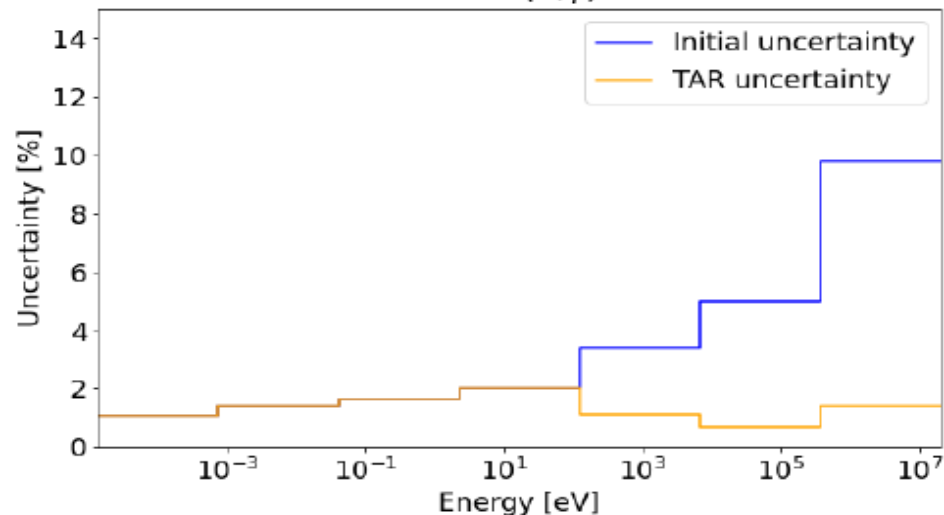
oui

■ Contact :

Cheikh Sidi-Mohamed
Kessedjian Grégoire

Sidi-Mohamed.CHEIKH@cea.fr
Gregoire.KESSEDJIAN@cea.fr

Objectifs du stage :



Résolution par minimisation sous contraintes du problème TAR (Target Accuracy Requirements) – Applications physiques

DER/SPRC/LEPh

Dans la simulation neutronique d'un concept de réacteur, à partir des sensibilités d'un paramètre d'intérêt aux données nucléaires, les incertitudes sur ces dernières peuvent être propagées pour obtenir une incertitude sur le paramètre calculé. Mais celle-ci peut être supérieure à sa valeur maximale, posée dans le cadre du projet de réacteur. La question est alors de savoir quelles améliorations il serait nécessaire d'apporter à la connaissance des données nucléaires pour rester dans l'enveloppe de l'incertitude cible. L'objectif du stage proposé est de construire un outil apportant cette réponse et de l'appliquer aux concepts étudiés.

Une des missions du CEA est la modélisation neutronique des réacteurs nucléaires. Les Outils de Calcul Scientifique (OCS) conçus pour cet objectif doivent être alimentés en données nucléaires, en particulier les sections efficaces d'interaction des neutrons avec les noyaux atomiques présents dans les configurations modélisées.

L'évaluation en amont des données nucléaires mises aux formats requis pour les bibliothèques d'application alimentant les OCS neutroniques se base sur des modèles théoriques et des mesures ; des incertitudes leur sont associées, sous forme de matrices de dispersion, contenant variances et covariances.

Un paramètre d'intérêt pour le réacteur modélisé étant choisi (facteur de multiplication, taux de réaction, concentration d'un noyau donné...), les OCS neutroniques peuvent calculer les sensibilités, sous forme d'un vecteur, de ce paramètre aux données nucléaires contenues dans la bibliothèque d'application. Matrice de dispersion et vecteur de sensibilité permettent alors de propager les incertitudes sur les données nucléaires en une incertitude sur le paramètre d'intérêt. Si la matrice de dispersion des données est notée D et si le vecteur de sensibilités est noté S , l'incertitude propagée sur le paramètre d'intérêt, notée ε , est telle que $\varepsilon^2 = S^T D S$.

Si l'incertitude ainsi obtenue est supérieure à l'incertitude cible ε_{cible} , c'est-à-dire au maximum admissible de l'incertitude établi pour le projet de réacteur, la question se pose de savoir

quelles sont les améliorations nécessaires sur la connaissance des données nucléaires, autrement dit quelles sont les diminutions de leurs variances juste nécessaires pour ramener ε à sa valeur cible ε_{cible} .

Tel quel, le problème est indéterminé. Afin de le rendre univoque, on définit une fonction de coût à minimiser, basée sur la plus ou moins grande difficulté à réaliser des mesures plus précises de telle ou telle donnée nucléaire. La forme consensuelle de cette fonction de coût est $C = \sum (w_i / \varepsilon_i)^2$, où chaque ε_i est l'incertitude initiale sur une donnée nucléaire individuelle et w_i un poids, déterminé par avis d'expert et représentant la difficulté de réduction de ε_i . A cette première contrainte s'ajoutent les intervalles admis pour les valeurs optimisées $\varepsilon_i^{opt} : \varepsilon_i^{min} \leq \varepsilon_i^{opt} \leq \varepsilon_i$.

Le premier objectif, mathématique et informatique, de ce stage est l'écriture d'un logiciel permettant de résoudre ce problème. En particulier, le choix justifié d'un logiciel libre de minimisation sous contrainte devra être fait, ainsi que la détermination de méthodes approchées plus rapides (et de leurs écarts vis-à-vis de la minimisation exacte) si nécessaire.

Le second objectif, physique, du stage est l'application à des concepts de réacteur étudiés au sein du service, concernant principalement l'obtention des incertitudes cibles sur le facteur de multiplication, avec une discussion sur la méthodologie (fonction de coût, poids, corrélations) ainsi que sur les résultats.

Formation souhaitée :

Master 2 en physique des réacteurs + compétences en programmation.

Durée du stage :

6 mois

Méthode/logiciel(s):

Python + logiciels libres (minimiseurs sous contrainte)

Mots clés :

Incertitudes cibles, minimisation sous contraintes

Possibilité de thèse :

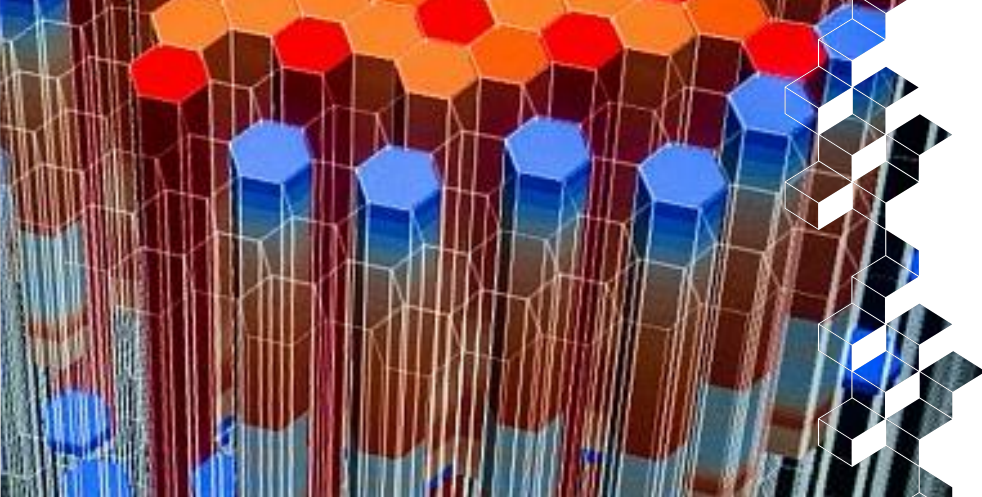
Non

Contact :

TOMMASI Jean

jean.tommasi@cea.fr





Amélioration de la modélisation des couvertures fertiles de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na)

DER/SPRC/LE2C

- **Sujet en cohérence avec les annonces récentes sur le déploiement de la filière RNR-Na en France**
- **Utilisation du code déterministe APOLLO3 pour évaluer la production de noyaux fissiles dans les zones fertiles d'un cœur de RNR-Na**

Contexte :

Le Conseil Politique Nucléaire (CPN) de mars 2026 a réaffirmé la volonté de la France de tendre vers la fermeture du cycle combustible via le déploiement d'une filière de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Les RNR permettraient en effet de se passer d'importation d'uranium naturel en exploitant pleinement les ressources disponibles sur le territoire. Cette stratégie repose sur la capacité des RNR à être surgénérateur, c'est-à-dire à produire plus d'atomes fissiles qu'ils n'en consomment. La surgénération est en général rendue plus élevée par l'ajout dans le cœur du réacteur de matière fertile sous la forme de couvertures axiales et radiales. Les fuites neutroniques du cœur fissile sont alors utilisées pour produire des atomes fissiles.

Des études récentes ont mises en évidence des difficultés de calcul fin de la production d'atomes fissiles dans les zones fertiles de RNR refroidis au sodium (RNR-Na) [1]. L'estimation de cette production est néanmoins critique pour les études de déploiement de cette filière de réacteurs. Les deux sources majeurs d'incertitude identifiées sont les biais associés au schéma de calcul et l'effet d'historique des barres sur les couvertures fertiles.

Objectifs :

Le but de ce stage est d'aboutir à une procédure de calcul rapide permettant d'évaluer avec une précision satisfaisante la production d'isotopes fissiles dans les couvertures fertiles. Les grandes étapes du stage sont :

- L'évaluation de la précision et l'amélioration des schémas de calcul existants pour l'évaluation du bilan matière des couvertures fertiles radiales et axiales. Un calcul de propagation des incertitudes sur les données nucléaires impliquées dans l'évolution pourra être réalisé.
- L'évaluation de l'effet d'historique des barres pour une meilleure représentation de la fluence dans les couvertures.

Le stagiaire réalisera ses calculs à l'aide du code déterministe APOLLO3 au travers de l'interface utilisateur python INCA.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python. Il devra faire preuve de dynamisme, de curiosité et d'initiative.

[1] A. Calame, « Contribution à la validation du calcul de la puissance résiduelle des réacteurs à neutrons rapides : aspects expérimentaux et méthodologiques », Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 2020.

■ Formation souhaitée :

3^{ème} année d'école d'ingénieur dans le domaine du nucléaire, ou formation Génie Atomique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Pack Office

■ Mots clés :

Neutronique, code déterministe, Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na)

■ Possibilité de thèse :

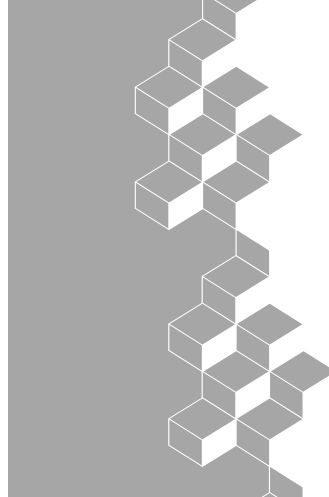
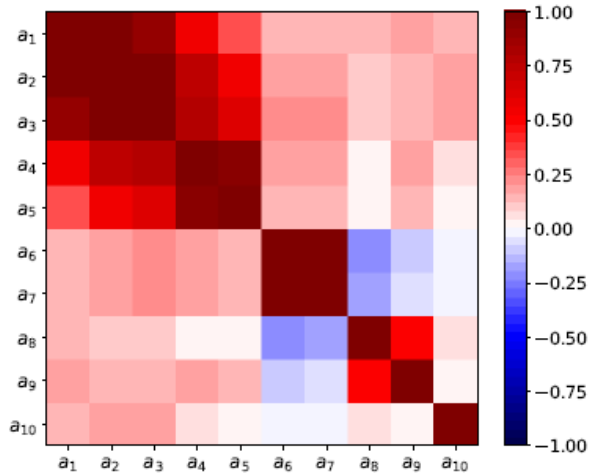
Oui

■ Contact :

VIALLOON Victor / TIREL Kévin / PETITEAU Vincent

Victor.viallon@cea.fr
kevin.tirel@cea.fr
vincent.petiteau@cea.fr





Parameter reduction on nuclear mass models

DER/SPRC/LEPh

Theoretical models that are developed in particular for the evaluation of Nuclear Data are characterized by a set of adjustable parameters that are calibrated against a selected set of observables. Although this procedure is widely used, it does not guarantee that all parameters are well constrained by the calibration data. Poorly constrained parameters may lead to unreliable predictions when the model is applied outside the calibration domain. Ideally, such parameters should be removed from the model or the model should be reformulated to reduce their influence.

Nuclear models are characterized by a set of free parameters that must be determined through an adjustment procedure in order to make the model predictive.

During the development of a model, little is usually known about the relative importance of each parameter. As a result, some parameters often remain poorly constrained. This issue may arise from two main causes. First, the set of observables used in the fitting procedure may not be sufficiently diverse to constrain all parameters independently. Second, some terms may be redundant or strongly correlated with others, preventing their independent determination.

If a model contains one or more poorly constrained parameters, its predictive power may deteriorate, particularly when extrapolated beyond the data used for the adjustment.

The goal of this internship is to perform a first investigation of the well-known but statistically *sloppy* nuclear mass model Duflo–Zuker with 33 parameters (DZ33). This model was developed to reproduce nuclear binding energies with remarkable accuracy. However, previous statistical analyses have suggested that at least three or four of its parameters are statistically compatible with zero, indicating that they may not play a significant role in the model.

The main objective of the project is to develop a simple, user-friendly Python package to investigate different algorithms for parameter reduction, with the long-term goal of applying these

techniques to more sophisticated nuclear models.

The DZ33 model is particularly well suited for this study because it is computationally inexpensive: the complete nuclear mass table can be evaluated in less than three minutes. At the same time, the model contains a relatively large number of parameters, making parameter reduction a challenging combinatorial problem. A naive strategy based on removing individual parameters—or even linear combinations of parameters—one at a time is not practical, since the number of possible parameter subsets is of the order of (2^{33}) .

The student will therefore investigate statistical methods capable of identifying the most relevant subset of parameters without performing an exhaustive search. In particular, Principal Component Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD) and Ridge regression will be explored as potential techniques for reducing the effective dimensionality of the model while preserving its predictive accuracy.

The main goal is to get a better insight on these methodology before applying them to the more sophisticated case of nuclear structure models currently developed at LEPh that are way more CPU expensive and more complex to handle, but they suffer from the same issue of poorly constraint or redundant parameters.

■ Formation souhaitée :

University

■ Durée du stage :

3 months

■ Méthode/logiciel(s):

Python

Basic knowledge of statistical concepts

■ Mots clés :

Statistics

Nuclear mass models

■ Possibilité de thèse :

Yes

■ Contact :

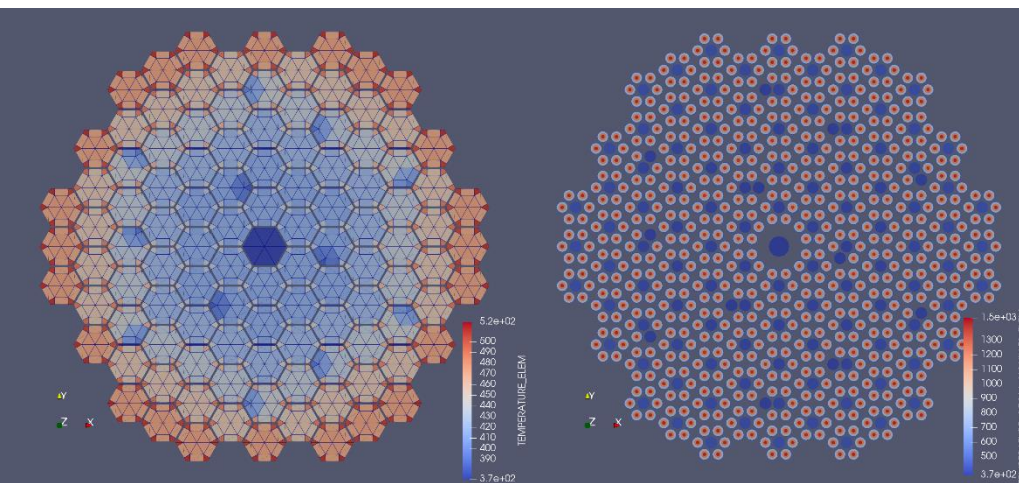
Pastore Alessandro

Alessandro.pastore@cea.fr



Quantification des incertitudes dans la modélisation multiphysique

DER/SPRC/LEPh



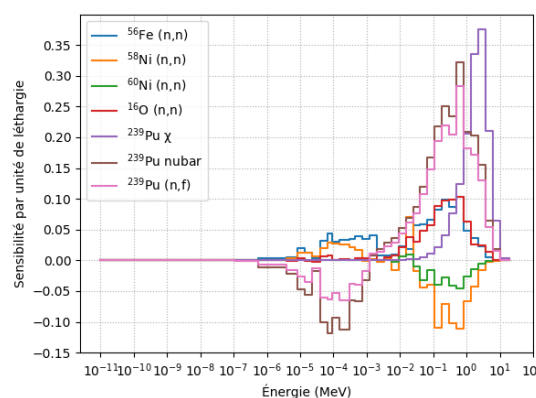
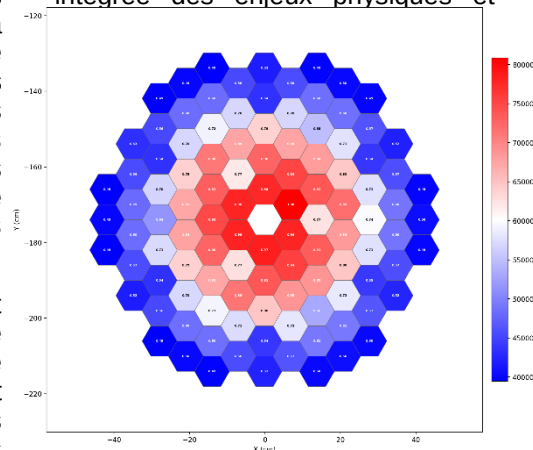
Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) représentent une filière stratégique pour le développement de l'énergie nucléaire durable. Ce stage propose d'étudier la physique neutronique de ces systèmes à travers des simulations multi-codes, une analyse des coefficients de réactivité et une démarche de Vérification, Validation et Quantification des Incertitudes (VV&QI). Les aspects multiphysiques, notamment les couplages neutronique-thermohydraulique et les effets de contre-réaction, seront également abordés, offrant à l'étudiant une vision complète des enjeux scientifiques et numériques liés aux RNR-Na.

Ce stage s'inscrit dans le cadre des travaux de validation et de développement des réacteurs à neutrons rapides (RNR-Na), qui constituent l'une des filières technologiques prioritaires pour la prochaine génération de réacteurs nucléaires. Dans ce contexte, la physique des réacteurs joue un rôle central : la maîtrise des paramètres neutroniques - tels que les coefficients de réactivité, les distributions de flux et les bilans neutroniques - est indispensable pour garantir la sûreté et les performances de ces systèmes.

Au cours de ce stage, l'étudiant participera à des activités de simulation neutronique à l'aide de codes stochastiques et déterministes, en s'appuyant sur les bibliothèques de données nucléaires les plus récentes. Une attention particulière sera portée à la Vérification, Validation et Quantification des Incertitudes (VV&QI), démarche pour établir la confiance dans les outils de calcul utilisés en conception et en sûreté des réacteurs. Des analyses de sensibilité permettront d'identifier les données nucléaires les plus influentes et de quantifier leur impact sur les grandeurs d'intérêt.

Le stage abordera également les aspects multiphysiques propres aux RNR-Na, en particulier les couplages entre la neutronique, la thermohydraulique et la mécanique des structures. Ces interactions, notamment à travers les coefficients de contre-réaction (effet Doppler,

dilatation du sodium, expansion des structures), sont déterminantes pour l'évaluation du comportement du réacteur en conditions normales et incidentelles. L'étudiant sera ainsi amené à développer une vision intégrée des enjeux physiques et



■ Formation souhaitée :

3^{ème} année école d'ingénieur nucléaire

Master 2 nucléaire

■ Durée du stage :

5-6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Neutronique, python

TRIPOLI4- APOLLO3

■ Mots clés :

RNR - OCS – Réacteur expérimental

■ Possibilité de thèse :

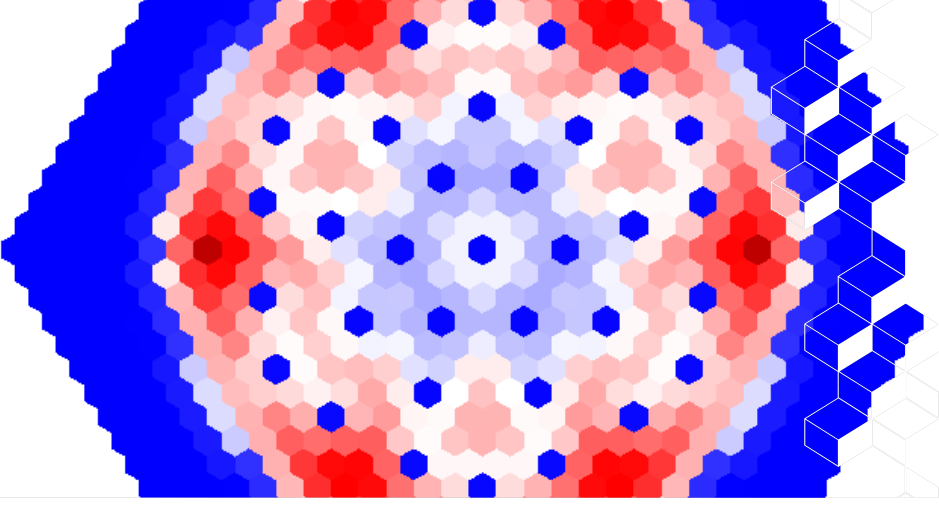
Oui

■ Contact :

GARCIA CERVANTES Elias Y.

Elias-Yammir.GARCIA-CERVANTES@cea.fr





Validation of APOLLO3® SCRAP calculation route for depletion calculations of small fast reactor core

DER/SPRC/LEPh

APOLLO3® is a deterministic neutron transport code developed at CEA. One of the roles of SPRC/LEPh laboratory in the APOLLO3® deployment is to create and validate new calculation routes, i.e. sets of computational methods and models optimized for different applications. One such calculation route, SCRAP, has been developed at SPRC/LEPh for fast reactor design studies, where the speed and flexibility of computational tools are the most important factor. The goal of the internship will be to continue the numerical validation of SCRAP, by applying it to a small SFR core and to extend the validation to a core depletion.

SCRAP is a deterministic calculation route designed for rapid calculations (order of several minutes) to be used in pre-design and design studies of solid-fuel fast reactors. The route is based on a standard two-step methodology, with a full 3D core calculation being preceded by a series of small-scale high fidelity calculations, known as lattice calculations, that provide representative few-group cross-sections. To achieve a low computational cost, SCRAP uses several approximations and simplified models that have to be carefully calibrated to achieve a sufficient level of accuracy. All SCRAP calculations are based on methods and solvers available in APOLLO3® code, a state-of-the-art deterministic code developed to be used by CEA and the French nuclear industry.

The work will focus on defining and performing SCRAP calculations of small fast reactor and comparing the results, such as multiplication factor or power distribution, with the numerical references, both at steady-state and during fuel depletion. Obtaining the reference results will require using two different tools, a continuous-energy Monte Carlo code TRIPOLI-4® as a reference for steady-state calculations and another, more accurate calculation route of APOLLO3® as a reference

for the depletion calculations. The goal of the comparisons is to determine if the performance of SCRAP meets the imposed criteria and if it can be further improved within an acceptable computational cost.

The candidate should have a good understanding of neutron transport theory and associated numerical methods and basic programming skills in Python.

■ Formation souhaitée :

Nuclear engineering (last year of Master's degree or equivalent)

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

APOLLO3®, TRIPOLI-4®, Python

■ Mots clés :

Neutronics, Fast reactors, Validation, APOLLO3®, Depletion

■ Possibilité de thèse :

no

■ Contact :

ZAJACZKOWSKI Maciej
maciej.zajaczkowski@cea.fr





Spectral Analysis and Reduced-Order Methods in Reactor Kinetics: Application to the MUSE4 Experiment

DER/SPRC/LEPh

Most transient modeling in neutronics relies on highly simplified methods, such as Point Kinetics. Recently, the reinterpretation of the MUSE4 experiment has allowed us to explore the limitations of this approach. This internship aims to better understand the physical reasons behind these limitations.

The MUSE4 experiment, conducted in the MASURCA reactor, generated valuable experimental data on very short timescales.

These data are particularly useful for validating kinetic models, especially spectral analysis methods.

Recent advancements in multi-point kinetics and its connection to spectral analysis now allow for a deeper exploration of higher modes and their physical significance.

Thanks to the deterministic code APOLLO3, which allows the computation of multi-point kinetics coefficients, and the Monte Carlo code TRIPOLI4, which can solve both the fundamental k mode and the alpha mode, the internship aims to review the analysis of the MUSE4 experiment using these techniques to improve the understanding of higher modes and their link to physical degrees of freedom.

The successful candidate will have a strong foundation in basic analysis methods and neutronics.

■ Formation souhaitée :
Master2

■ Durée du stage :
6 months

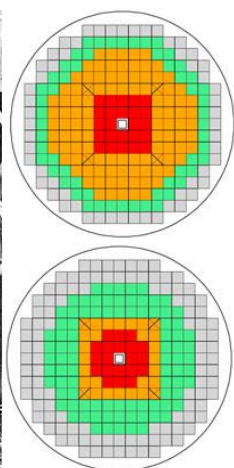
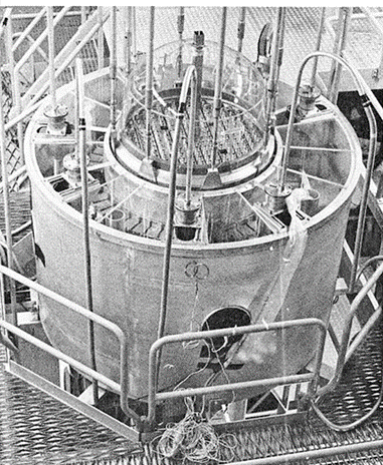
■ Méthode/logiciel(s):
APOLLO3, TRIPOLI4

■ Mots clés :
Neutronics, Kinetics, MPK

■ Possibilité de thèse :
no

■ Contact :
VALOCCHI Giorgio
Giorgio.VALOCCHI@CEA.fr





- Oscillator element
- Fuel, inner region
- Fuel, outer region
- Safety element
- Lead
- Graphite

Analyse neutronique de l'expérience STEK pour la validation des outils de calcul scientifique.

DER/SPRC/LEPh

Ce stage offre une opportunité de réexaminer l'expérience STEK, dans une démarche de validation et quantification des incertitudes avec des outils de calcul scientifique (OCS) de dernière génération. Ce stage contribuera à la validation des données nucléaires des produits de fission vers le développement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires.

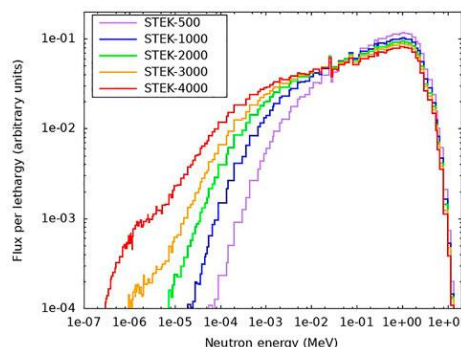
L'expérience STEK avait pour objectif principal de mesurer de manière exhaustive les sections efficaces des produits de fission. Ces mesures, réalisées grâce à une technique d'oscillateur dans un réacteur à puissance nulle, ont permis de déterminer les sections efficaces à partir de variations de réactivité centrale. Le cœur du réacteur présentait une zone externe à spectre thermique et un cœur interne à spectre rapide, offrant ainsi un environnement idéal pour étudier le comportement des produits de fission dans des conditions variées.

Historiquement, les données obtenues grâce à STEK ont été cruciales pour améliorer et valider les évaluations des données nucléaires des produits de fission, notamment dans les bibliothèques telles qu'ENDF/B ou JEFF. En quantifiant la précision de ces bibliothèques dans des spectres rapides, STEK a contribué à renforcer la fiabilité des simulations de réacteurs nucléaires.

L'intérêt renouvelé pour les spectres rapides, en lien avec les nouvelles générations de réacteurs et les cycles de combustible avancés, redonne une actualité aux données STEK. Une réévaluation de ces données s'avère donc essentielle pour répondre à la demande croissante de données nucléaires

précises dans ce domaine.

Au cours de ce stage, l'étudiant utilisera des codes de calcul neutronique stochastiques (TRIPOLI-4) et déterministes (APOLLO-3) pour simuler les expériences STEK. Les résultats de ces simulations seront comparés aux données expérimentales existantes. Une analyse de sensibilité permettra d'évaluer l'impact des incertitudes sur les résultats. Par ailleurs, une étude de la représentativité de STEK par rapport aux conditions actuelles des réacteurs à spectre rapide sera menée, afin d'évaluer la pertinence de transposer les résultats de STEK à des applications modernes.



■ Formation souhaitée :

3^{ème} année école d'ingénieur nucléaire

Master 2 nucléaire

■ Durée du stage :

5-6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Neutronique, python

TRIPOLI4- APOLLO3

■ Mots clés :

RNR - OCS – Réacteur expérimental

■ Possibilité de thèse :

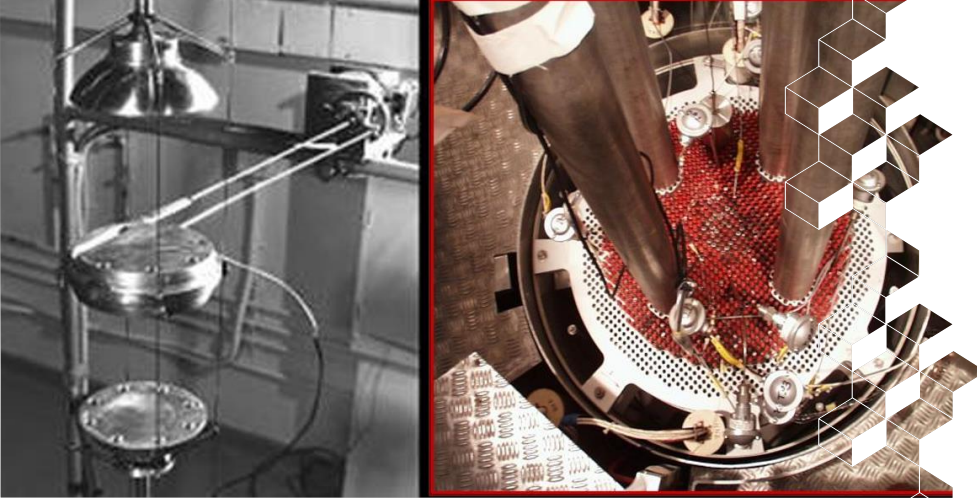
Non

■ Contact :

GARCIA CERVANTES Elias

Elias-Yamir.GARCIA-CERVANTES@cea.fr





Sûreté-criticité : vers une méthodologie d'exploitation optimisée de la validation expérimentale

DER/SPRC/LEPh

Le risque de criticité est présent sur toutes les installations du cycle du combustible nucléaire mettant en œuvre de la matière fissile. La prévention de ce dernier passe notamment par la réalisation de simulations numériques. L'objectif de ce stage est d'appréhender différentes approches méthodologiques visant à encadrer l'exploitation la base de validation expérimentale de l'outil de calcul scientifique de sûreté-criticité français. La quantification des biais et incertitudes de calcul par les industriels étant un élément capital des études de criticité.

Les études de sûreté-criticité visent à établir les dispositions, nécessaires et suffisantes pour prévenir le risque d'amorçage et d'entretien de réactions de fission en chaîne. Elles sont réalisées à partir d'outils tel que l'Outil de Calcul Scientifique (OCS) CRISTAL. Ces derniers disposent de dossiers de vérification et de validation regroupant, notamment, des éléments démontrant leur capacité à reproduire des résultats expérimentaux représentatifs des configurations d'application. Cette validation, et son applicabilité aux différentes configurations industrielles, représente une des problématiques majeure en sûreté-criticité. En effet, de part la grande diversité des applications rencontrées en criticité (type de milieu fissile, géométrie, etc.), les industriels peuvent être amenés à traiter des configurations peu ou pas représentées dans le dossier de validation. De tels cas de figure obligent à tenir compte de marges supplémentaires.

La mise en œuvre de la méthode dite de transposition permet malgré tout de tirer profit des éléments de la validation expérimentale afin d'estimer les potentiels biais et incertitudes de calcul dus aux données nucléaires sur le coefficient effectif de multiplication. Le recours à un grand nombre d'expériences de la base de validation nécessite, en toute rigueur, la considération des corrélations induites par les paramètres expérimentaux incertains, partagés entre ces expériences. Cependant, de nombreux travaux internationaux, notamment dans le cadre de groupes d'experts de l'OCDE/AEN dans lesquels le CEA est impliqué, pointent la très grande difficulté d'obtenir des coefficients fiables et robustes pour un grand nombre d'expériences historiques.

De précédents travaux ont démontré que la méconnaissance de cette grandeur pouvait amener à une variabilité significative des résultats de transposition, difficilement contournable par les critères usuels de sélection d'expériences dites représentatives. Une

solution serait d'étudier de nouveaux critères de sélection d'expériences. Ces derniers, basés sur des approches statistiques, permettraient d'extraire toutes données physiquement incompatibles d'un point de vue statistique, et ainsi pallier la méconnaissance des corrélations expérimentales. Pour cela, des combinaisons de plusieurs critères pourront également être envisagées.

Après la prise en main des outils de l'OCS CRISTAL : déterministe (APOLLO2) et Monte-Carlo (TRIPOLI-4®), le stage consistera à approfondir la réflexion sur différentes approches de sélection/réjection d'expériences dans le processus de transposition des biais et incertitudes de calcul.

Ce stage permettra à l'étudiant de prendre en main les outils de modélisation neutronique (déterministe et Monte-Carlo), d'appréhender la notion de schémas de calcul en criticité, ainsi que la problématique clé d'exploitation des bases de validation expérimentale en vue de déterminer les biais et incertitudes de calculs pour les études de sûreté-criticité. La méthode abordée est d'intérêt majeur dans le cadre des démarches de validation et quantification des incertitudes des codes de calcul.

Ce sujet représente un intérêt pour les travaux de recherche et développement du CEA, ses partenaires industriels, et s'intègre dans les réflexions de la communauté internationale.

■ Formation souhaitée :

3ème année d'Ecole d'ingénieur, Master 2 en Physique nucléaire

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Propagation d'incertitudes, APOLLO2, TRIPOLI-4, CONRAD

■ Mots clés :

criticité, validation expérimentale, biais et incertitudes, CRISTALV2

■ Possibilité de thèse :

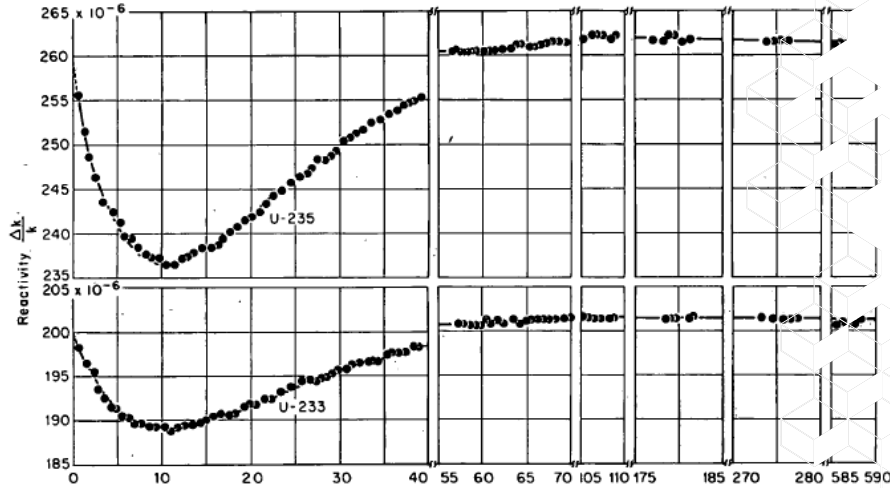
non

■ Contact :

NICOL Tangi/CARMOUZE Coralie

Tangi.nicol@cea.fr
coralie.carmouze@cea.fr





Pré-dimensionnement d'une mesure de section efficace de capture neutronique du Xénon-135

DER/SPRC/LEPh

Le ^{135}Xe est le plus puissant poison neutronique des réacteurs nucléaires, mais sa section efficace thermique repose encore sur des mesures de 1959 entachées d'une incertitude de 5% à 10%. Sa très courte demi-vie (9,17 h) rend sa caractérisation expérimentale directe extrêmement complexe. Lever ce verrou scientifique permettra de réduire les marges de conservatisme des calculs de sûreté et d'optimiser l'exploitation des réacteurs actuels (suivi de charge) et futurs (SMR, EPR2).

Cette proposition de stage s'inscrit dans le cadre d'un nouveau programme expérimental qui porte sur la mesure de la section efficace de capture du ^{135}Xe . Ce programme consiste en l'irradiation d'un échantillon d'uranium, afin de produire de l' ^{135}I , précurseur du ^{135}Xe , suivie par la mesure de la concentration en ^{135}Xe à différents temps ou en continu par les méthodes de spectrométrie gamma et/ou d'oscillation de pile.

Dans le cadre de ce stage, l'étudiant(e) étudiera divers scénarios d'irradiation afin de maximiser la quantité de ^{135}Xe tout en minimisant l'activité totale de l'échantillon. Maximiser la quantité de Xe permettra d'améliorer l'incertitude de mesure. Minimiser l'activité de l'échantillon permettra de réduire la dose travailleur ainsi que le temps de « refroidissement » de l'échantillon avant son transport vers l'installation où il sera mesuré, et permettra donc d'obtenir des données sur le début de la croissance du pic xénon.

Le stage se déroulera en plusieurs étapes :

- Etude bibliographique sur les méthodes de mesure de la section de capture du Xe135.
- Prise en main des outils de simulation neutroniques

évolutives (MENDEL et TRIPOLI4®)

- Premiers calculs d'optimisation avec MENDEL avec un flux supposé constant dans le volume de l'échantillon
- Simulation TRIPOLI4 du réacteur d'irradiation pour obtenir un flux 3D dans l'échantillon
- Simulations MENDEL avancée avec un flux plus réaliste

■ Formation souhaitée :

Master ou dernière année d'Ecole d'ingénieur en Physique Nucléaire

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

MENDEL, TRIPOLI4®

■ Mots clés :

Pic xénon, calculs en évolution

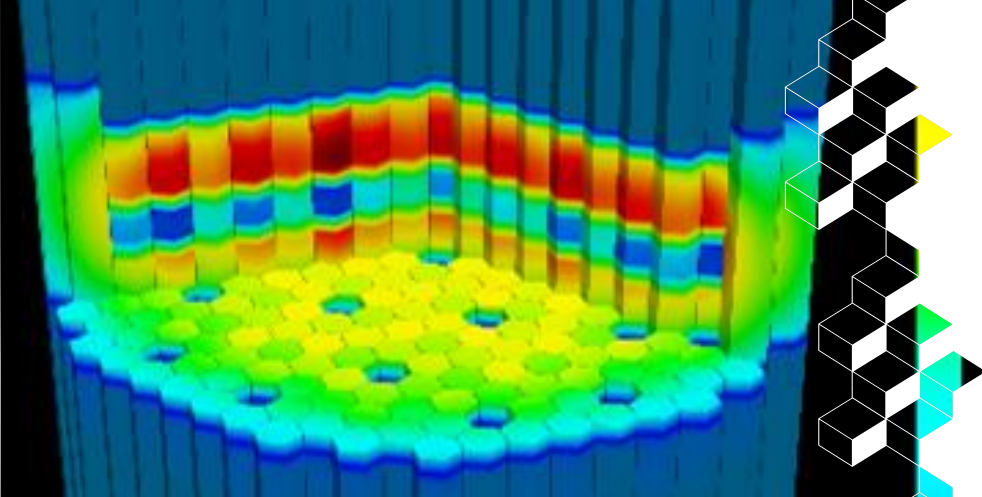
■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Leconte Pierre
Pierre.leconte@cea.fr





Developing new methods for neutronics validation and multi-physics modeling of GEN IV reactors with the INCA platform

DER/SPRC/LEPh

Reactor physics simulations rely on a number of computational tools which usually treat each separate physics aspect independently. At SPRC, the INCA platform is being developed to build a unified model able to interact with the different physics. The aim of this internship is to develop new functionalities and expand the domain of usage of the platform.

The domain of reactor physics is a complex field, exploring all physical phenomena taking place in and around a fission reactor's core during its functioning. Since it includes processes that span over very different time and spatial scales, it often relies on several different tools, each of them optimized to study a specific problem.

Some of the tools used at CEA include APOLLO3 and TRIPOLI4 (neutronics), CATHARE3 (thermo-hydraulics), GERMINAL (fuel thermo-mechanics).

The INCA platform (Interface Neutronique de Conception Avancée) is a python interface developed with the ambition of unifying the physical and geometric description of a problem, providing an easier way to model, especially when two or more simulation tools are needed, as is the case for multi-physics or V&V (verification and validation) studies.

This internship aims at developing new automated tools for the INCA platform to assess this kind of studies. The candidate will work on the development of these tools while testing their performance on true reactor applications, particularly on 4th generation fast reactors.

The ideal candidate has a solid background in python programming and a keen interest for nuclear reactor physics, as well as a good inclination for independent work.

■ Formation souhaitée :
Master2

■ Durée du stage :
6 months

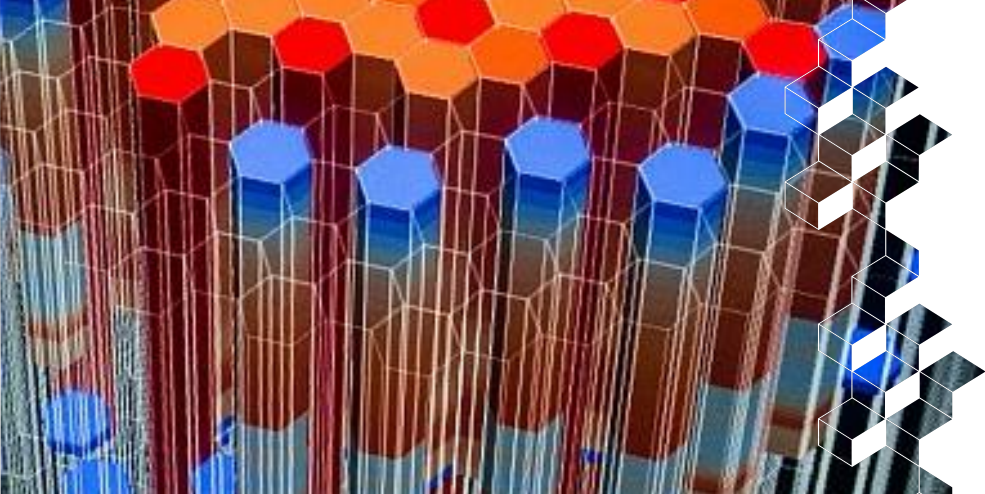
■ Méthode/logiciel(s):
APOLLO3, TRIPOLI4, INCA

■ Mots clés :
Neutronics, Multi-physics,
programming, V&V

■ Possibilité de thèse :
no

■ Contact :
GUADAGNI Ettore
Ettore.GUADAGNI@CEA.fr





Méthodes statistiques pour la modélisation de scénarios électronucléaires

DER/SPRC/LE2C

- **Stage pleinement inscrit dans les enjeux climatiques et énergétiques actuels**
- **Démarche de réduction des incertitudes des paramètres opérationnels des réacteurs du parc nucléaire**
- **Observation de la répercussion de ces incertitudes sur les inventaires de matière du parc**

Contexte

Organiser et planifier l'évolution future du parc nucléaire français constitue un des axes majeurs pour répondre aux enjeux climatiques et de souveraineté énergétique. Les **simulations de scénarios électronucléaires** permettent de fournir des images de futurs possibles du parc nucléaire pour guider les réflexions et les échanges. Un scénario modélise tous les échanges de flux de matière au sein du cycle du combustible : l'extraction du minerai d'uranium, procédés de conversion et enrichissement, fabrication du combustible, irradiation en réacteur, retraitement du combustible usé, production de déchets.

La crédibilité des futurs possibles illustrés par les résultats de scénario reposent sur la **qualité des données et des modèles utilisés**. En particulier, la modélisation de l'historique du parc français doit permettre de reproduire au plus proche les inventaires de matière sur le territoire. Pour ce faire, une connaissance fine de tous les chargements et déchargements qui ont eu lieu est nécessaire. Cette information, quand elle est accessible, reste néanmoins affectée d'une certaine **incertitude** ou peut souffrir d'un biais du fait de l'outil de simulation.

Objectifs du stage

Dans ce contexte, ce stage propose la mise en place d'une méthodologie de prise en compte des incertitudes pour la modélisation du parc actuel. Cette méthodologie s'inspire de travaux récents [1] et repose sur l'utilisation de l'algorithme de Metropolis-Hastings pour réduire l'incertitude sur les paramètres opérationnels des réacteurs (burn-up de décharge, facteur de charge...). Les données de recalage nécessaires à l'utilisation de l'algorithme sont disponibles dans la littérature (inventaires ANDRA [2]).

Lors de ce stage, le candidat devra :

- Modéliser le parc nucléaire français à l'aide de l'outil de calcul de scénario COSI7 en se basant sur des données disponibles dans la littérature.
- Mettre en place et utiliser l'algorithme de Metropolis-Hastings pour maîtriser l'incertitude des données opérationnelles.
- Déterminer l'incertitude sur les grandeurs d'intérêt du scénario à moyen terme.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python. Il devra avoir une formation solide et/ou un intérêt prononcé pour les méthodes statistiques.

[1] Durox et al., « Improving French Plutonium Inventory Assessment via Metropolis-Hastings Algorithm », Proceedings of PHYSOR 2026, Turin, Italy, 2026

[2] ANDRA, <https://inventaire.andra.fr/les-donnees-annuelles/inventaire-national-en-open-data>, consulté le [03/09/2026]

- Formation souhaitée :

3^{ème} année d'école
d'ingénieur ou Master 2

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, Pack Office

- Mots clés :

Scénario électronucléaire,
méthodes statistiques,
incertitudes, algorithme de
Metropolis-Hastings

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

TIREL Kévin

Kevin.tirel@cea.fr





Modélisation neutronique des cœurs de type VVER-1000

DER / SPRC / LE2C

Modélisation neutronique des réacteurs VVER : un stage de 6 mois au cœur de l'innovation nucléaire

Dans l'objectif de valider ses Outils de Calcul Scientifique (OCS), le CEA s'appuie sur des campagnes expérimentales dans ses installations et celles de ses partenaires internationaux. Dans ce cadre, le CEA participe à des benchmarks : des exercices de comparaison, où plusieurs organismes de recherche modélisent le même cas de réacteur avec leurs propres outils, puis comparent leurs résultats entre eux et à des données expérimentales. Cela permet de vérifier la fiabilité des méthodes de calcul du CEA et d'identifier d'éventuels écarts entre codes. Depuis 2024, le CEA a démarré des travaux sur le benchmark « Rostov-2 » proposé par l'OCDE/NEA : (https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_32189/rostov-2-vver-1000-benchmark).

Le réacteur Rostov-2 appartient à la filière VVER (*Water-cooled Water-moderated Energy Reactor*), des réacteurs à eau pressurisée de conception russe, fonctionnant avec du combustible UOX standard. Une vingtaine de VVER sont actuellement en service dans l'Union Européenne.

Si leur fonctionnement rappelle celui des REP occidentaux, les VVER-1000 (1000 MW de puissance électrique) présentent des spécificités par rapport aux réacteurs du parc français : un réseau d'assemblages hexagonaux (et non carrés), des réflecteurs aux géométries spécifiques, des générateurs de vapeur horizontaux. Le CEA dispose de schémas de calcul éprouvés pour le parc français et pour les études sur les RNR-Na — l'enjeu est désormais de les adapter

à ces particularités avec les méthodes et codes de calculs les plus récents.

Votre mission : contribuer au développement d'un schéma de calcul pertinent pour les VVER, à partir des outils validés pour les REP et RNR-Na en se basant sur les acquis du CEA dans les projets passés (NURESIM/CAMIVVER) ; produire des résultats utiles pour la physique des réacteurs et du cycle ; comparer vos résultats à des calculs de référence Monte Carlo. Selon l'avancement, vous pourrez également explorer un couplage neutronique/thermohydraulique. **Vos outils :** le code déterministe APOLLO3® pour la neutronique, avec TRIPOLI-4 comme référence stochastique ; CATHARE3 pour la thermohydraulique cœur et système.

Ce stage est une occasion unique de travailler à la croisée de plusieurs disciplines — neutronique, thermohydraulique, méthodes numériques déterministes — et de comprendre concrètement ce qu'implique la construction d'un schéma de calcul.

Profil recherché : intérêt pour la physique des réacteurs nucléaires, goût pour la simulation numérique, et curiosité pour les problématiques de couplage entre disciplines.

■ Formation souhaitée :

Master 2, 3^{ème} année d'école d'ingénieurs

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

APOLLO3 / TRIPOLI-4 / CATHARE3

■ Mots clés :

Modélisation neutronique, schéma de calcul, couplage multiphysique

■ Possibilité de thèse :

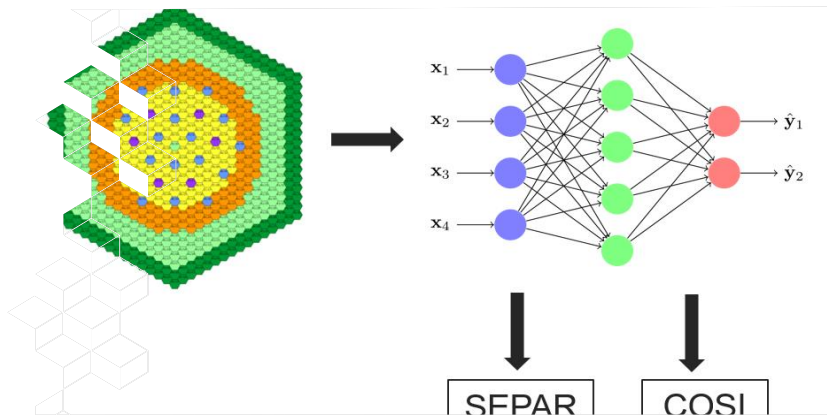
Non

■ Contacts :

PETITEAU Vincent
vincent.petiteau@cea.fr

OLITA Paolo
paolo.olita@cea.fr





Amélioration des méta-modèles par réseaux de neurones pour les scénarios électronucléaires de parcs mixtes REP / RNR

DER/SPRC/LE2C

Le stage se déroule au sein de l'équipe Scénarios du Service de Physique des Réacteurs et du Cycle (SPRC), au laboratoire LE2C du CEA IRESNE. L'équipe développe notamment des outils de simulation de scénarios électronucléaires permettant d'étudier les évolutions possibles des parcs nucléaires français et européens, en intégrant l'ensemble du cycle du combustible.

Les études exploratoires de scénarios (analyses de sensibilité, études paramétriques, optimisation) requièrent un très grand nombre de simulations. Les calculs de neutronique détaillés étant trop coûteux en temps pour être répétés à cette échelle, ils sont remplacés par des méta-modèles (réseaux de neurones) entraînés sur des données de référence. La précision et la robustesse de ces méta-modèles conditionnent directement la qualité des études de scénarios.

Objectifs du stage

1. Analyser les architectures de réseaux de neurones actuellement utilisées dans les outils de scénario et identifier leurs limites (précision, domaine de validité, coût d'entraînement).
2. Proposer, développer et évaluer de nouvelles architectures afin d'améliorer la précision des prédictions.
3. Intégrer l'architecture retenue dans l'outil de scénario du laboratoire et valider son comportement sur des cas d'étude représentatifs.
4. Selon l'avancement, mener une étude d'optimisation des paramètres de conception des RNR sous contraintes techniques et de cycle, en s'appuyant sur les nouveaux méta-modèles.

Déroulement indicatif

- Prise en main des outils de scénario et des bases de données d'apprentissage existantes
- État de l'art et développement des nouvelles architectures (Python)
- Comparaison des performances et sélection
- Intégration dans l'outil de scénario (C++) et validation
- Étude d'optimisation (si le temps le permet) et rédaction du rapport

Profil recherché

Étudiant(e) en dernière année d'école d'ingénieur ou de master (data science, mathématiques appliquées, génie nucléaire ou physique).

- Solides compétences en data science
- Bonne maîtrise de Python (bibliothèques type PyTorch / TensorFlow / scikit-learn appréciées)
- Connaissances en C++
- Notions d'optimisation mathématique
- Goût pour le développement logiciel et le travail en équipe
- Des connaissances en physique des réacteurs ou en cycle du combustible sont un plus, mais ne sont pas indispensables

Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou master 2 en mathématique appliquées/informatique ou en physique des réacteurs

Durée du stage :

5-6 mois

Méthode/logiciel(s):

COSI, SEPAR, PYTHON, C++

Mots clés :

Méta-modèles, réseaux de neurones, scénarios électronucléaires

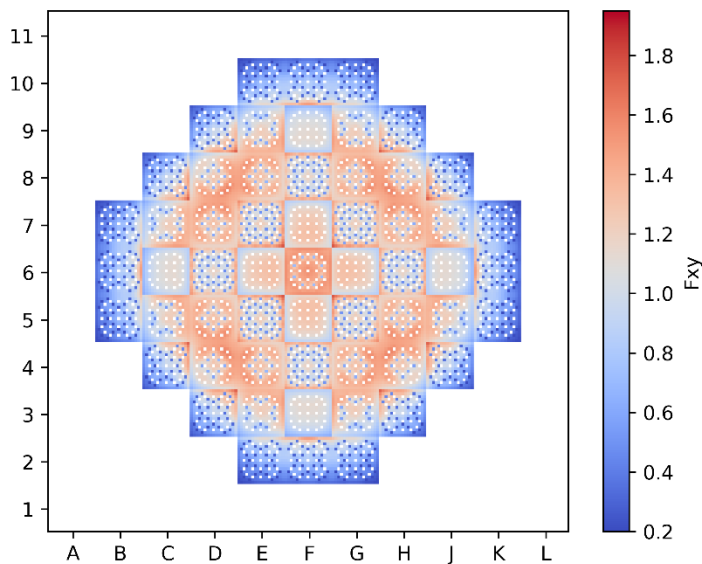
Possibilité de thèse :

Non

Contact :

L'Hostis Alan, Sabathé Mathias
Alan.L'HOSTIS@cea.fr
Mathias.sabathe@cea.fr





Perturbation theory and kinetic calculations: an application with the PRATIC benchmark

DER/SPRC/LE2C

Transient modelling is among the most challenging from the computational point of view. In these cases, huge approximations are needed to perform them, and uncertainty quantification is usually impractical and rarely performed. This internship aims to fill this gap for the PRATIC benchmark, a CEA-developed SMR model.

The SPRC (Service de Physique des Réacteurs et du Cycle) focuses on reactor and cycle modeling, including multiphysics analysis. Such analyses require accounting for the interactions among multiple physical phenomena as well as their time-dependent evolution.

However, a significant portion of reactor physics modeling still relies on equilibrium configurations.

In such cases, the critical formulation of the transport problem has proven highly effective in providing deep physical insights. Additionally, perturbation theory within this framework enables efficient computation of sensitivity coefficients, facilitating comprehensive uncertainty propagation.

Unfortunately, the critical formulation has an open degree of freedom that needs to be constrained, usually by imposing a power normalization.

This limitation prevents the direct application of perturbation calculations in uncertainty

propagation for reactor power.

The internship aims to address this gap by using simplified kinetic models. The goal is to enable uncertainty propagation during transients while maintaining computational efficiency and analytical convenience.

The developed methods will be validated using the PRATIC benchmark, an SMR (Small Modular Reactor) model developed at CEA, and the APOLLO3 code.

The successful candidate will have a strong foundation in basic analysis methods and neutronics.

■ Formation souhaitée :

Master2

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

APOLLO3

■ Mots clés :

Neutronics, Kinetics, SMR

■ Possibilité de thèse :

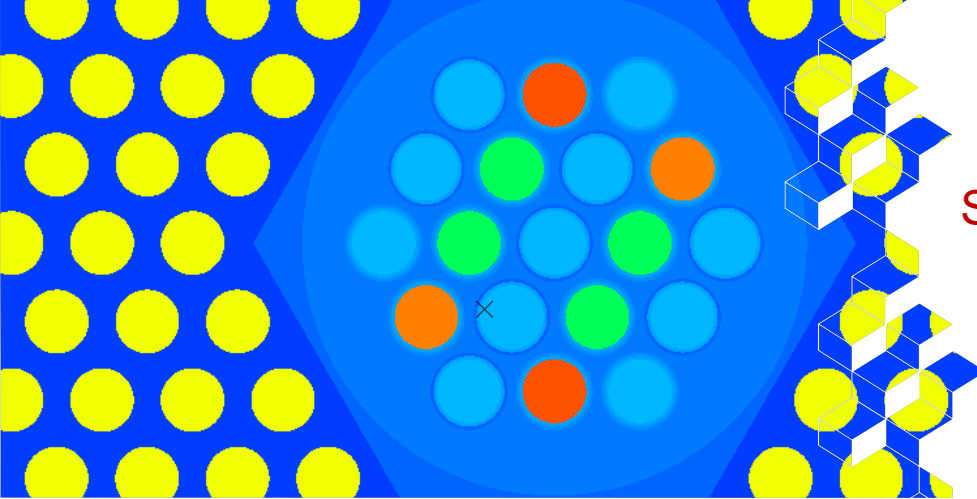
No

■ Contact :

Prulhiere Geraud / Lehoux
Grégoire / Valocchi Giorgio

Gregoire.lehoux@cea.fr





Simulation de l'irradiation de transmutation SUPERFACT (PHENIX) avec APOLLO3

DER/SPRC/LE2C

Dans ce stage, vous aurez l'occasion de :

- **Contribuer à la validation du code APOLLO3®.**
- **Réaliser des calculs neutroniques pour analyser l'expérience de transmutation SUPERFACT.**

Ces données seront ensuite exploitées pour la qualification des code de simulation combustible PLEIADES-GERMINAL.

Une voie complémentaire pour la gestion des déchets nucléaires consiste à transmuter certains radionucléides pour réduire les quantités et la nocivité; le CEA et le SPRC en particulier étudient cette possibilité. Certains actinides comme l'américium ou le neptunium peuvent être incorporés au combustible des réacteurs à neutrons rapides, ce qui permet de les transformer sous flux et ainsi limiter les problématiques liées à leur gestion en tant que déchets. Pour démontrer la faisabilité de cette transmutation, le CEA a irradié des aiguilles contenant ces actinides mineurs dans le cadre du programme SUPERFACT mené au sein de le réacteur PHENIX.

Cette expérience d'irradiation a été en partie interprétée à l'aide du code Monte-Carlo TRIPOLI4 pour établir un calcul de référence. Le but de ce stage est, pour les quantités d'intérêt neutroniques (taux de transmutation, production de gaz de fission, etc..) de valider les outils de simulation neutroniques déterministes pour ce type de concept à l'aide du code de nouvelle génération APOLLO3®.

Après la prise en main du code APOLLO3®, l'étudiant devra dans un premier temps reproduire, à l'aide du schéma de calcul dédié, les résultats des aiguilles SUPERFACT 4 et 6 obtenus avec le code TRIPOLI4 (flux neutron, puissance linéique, doses

absorbée, bilan isotopique à chaque cycle d'irradiation). La comparaison entre les deux codes permettra de valider le schéma de calcul APOLLO3®.

Une fois passé l'étape de validation, l'étudiant pourra simuler via APOLLO3 l'ensemble des aiguilles contenant les actinides mineurs ainsi que les aiguilles standard et celles en titane présentes dans la même capsule expérimentale. Ces résultats seront ensuite exploités pour la qualification du code de simulation combustible PLEIADES-GERMINAL.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python. De plus, il devra avoir des connaissances en neutronique et faire preuve de dynamisme et de curiosité. Une première expérience en simulation avec des codes de calcul serait un plus.

■ Formation souhaitée :

3eme année d'Ecole d'ingénieur, Master 2 en Physique nucléaire.

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Pack Office, APOLLO3, TRIPOLI-4, DARWIN (ou équivalent)

■ Mots clés :

Neutronique, code déterministe, RNR-Na, PHENIX, transmutation

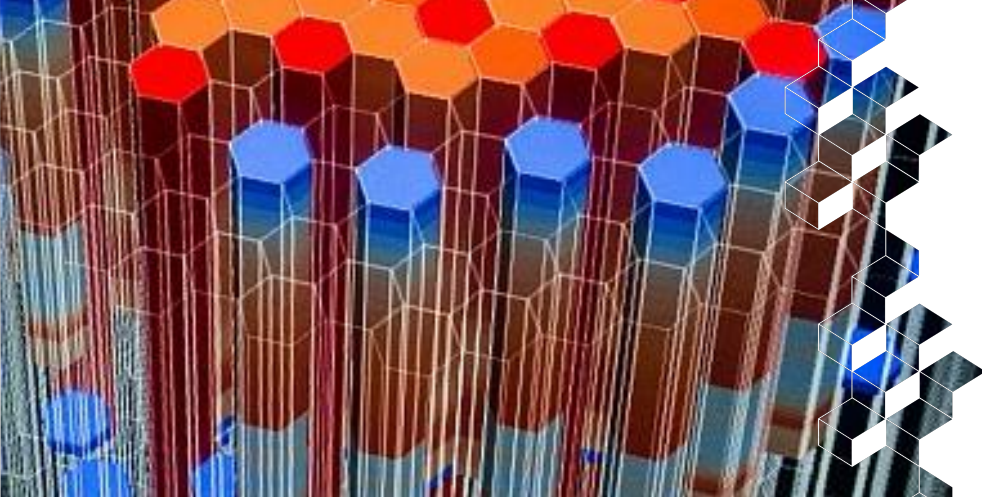
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

CORE Laura/ BUIRON Laurent
laura.core@cea.fr
laurent.buiron@cea.fr





Calcul de criticité de pour les scénarios électronucléaires.

DER/SPRC/LE2C

Dans ce stage, vous aurez l'occasion de :

- **Réaliser des calculs de criticité portant sur des combustibles UOX/MOX en solution nitrique et établir un modèle simplifié.**
- **Utiliser ce nouveau modèle dans des outils de simulation du cycle du combustible.**

Afin d'évaluer les mélanges de combustibles usés aux retraitement dans les scénarios électronucléaires.

La France a confirmé la poursuite de ses activités de recyclage des combustibles usés jusqu'à la fin du 21^e siècle et en conséquence s'engage à renouveler ses installations de l'aval du cycle du combustible. Dans le cadre du multi-recyclage du plutonium et de l'uranium en REP, la France devrait à terme retraiter des combustibles MOX en plus des combustibles UOX déjà retraités aujourd'hui. Le risque de criticité doit être exclu durant toutes les étapes du retraitement du combustible. C'est l'objectif des études de sûreté-criticité, qui utilisent à cette fin des Outils de Calcul Scientifique (OCS) tels que CRISTAL. Pour garantir l'absence de risque de criticité, ces études se basent sur un ensemble d'hypothèses conservatives (compositions neuves, crédit burnup, ...) permettant de garantir des marges suffisantes. Le retraitement des combustibles MOX implique une augmentation de la teneur en plutonium dans les procédés, et des poisons neutroniques peuvent être ajoutés dans les procédés pour maîtriser le risque de criticité.

L'étudiant devra dans un premier temps mener une étude paramétrique portant sur des calculs de criticité de combustibles usés UOX/MOX en solution nitrique en faisant varier les spécifications des combustibles usés (ratio, teneur en

plutonium, vecteur plutonium...) et prenant en compte des hypothèses de calculs différentes pour l'isotopie du combustible irradié. Pour ce faire, il prendra en main l'OCS CRISTAL (APOLLO2 et/ou TRIPOLI4) à la suite de calculs d'évolution isotopique et déroulera un plan d'expérience mis au point en collaboration avec ces encadrants. Il s'appuiera sur des configurations déjà présentes dans le dossier de vérification et de validation de l'OCS.

Dans un second temps, un modèle simplifié estimant le coefficient de multiplication, basé sur les calculs réalisés, sera proposé par l'étudiant. L'étudiant devra intégrer ce modèle dans un outil de simulation du cycle du combustible afin d'estimer, dans un cadre académique, les impacts du risque de criticité sur la construction des mélanges de combustibles usés.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python. De plus, il devra avoir des connaissances en neutronique et faire preuve de dynamisme et de curiosité. Une première expérience en simulation avec des codes de calcul serait un plus.

■ Formation souhaitée :

3^eme année d'Ecole d'ingénieur, Master 2 en Physique nucléaire.

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Pack Office, APOLLO2, TRIPOLI-4, DARWIN (ou équivalent)

■ Mots clés :

Neutronique, criticité, code déterministe, combustible usé, retraitement

■ Possibilité de thèse :

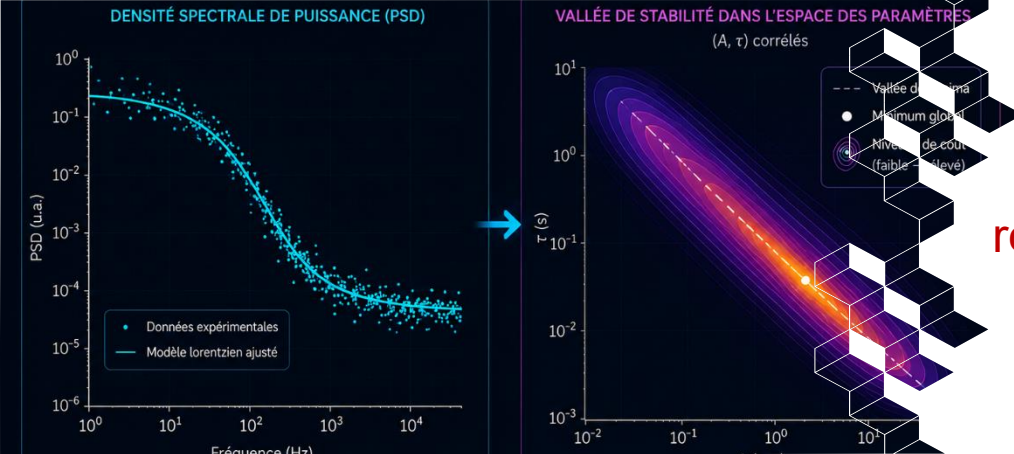
Non

■ Contact :

NICOL Tangi / EUSTACHE Aimeric

aimerice.eustache@cea.fr
tangi.nicol@cea.fr





Analyse de l'identifiabilité et méthodes d'estimation robustes pour l'analyse du bruit neutronique par modèles lorentziens

DER/SPRC/LPN

Ce stage vous offrira l'opportunité de développer des méthodes innovantes pour identifier les paramètres clés des modèles spectraux (Rossi- α , Cohn- α , multi-modaux), en combinant analyse théorique (identifiabilité, corrélations) et solutions algorithmiques (optimisation globale, régularisation, etc.).

L'analyse du bruit neutronique constitue un outil non intrusif permettant d'accéder aux paramètres cinétiques et aux propriétés dynamiques des réacteurs nucléaires à partir des fluctuations naturelles du flux neutronique. Les méthodes de Rossi- α et de Cohn- α sont aujourd'hui largement utilisées pour exploiter ces fluctuations en ajustant des modèles analytiques aux fonctions de corrélation temporelle ou aux densités spectrales de puissance mesurées.

Les développements récents de modèles multi-modaux permettent désormais de prendre en compte les effets spatiaux du cœur et de relier directement les spectres mesurés aux modes propres du système neutronique. Les signaux expérimentaux apparaissent alors comme une superposition de composantes lorentziennes dont les amplitudes dépendent du couplage entre les détecteurs et les modes spatiaux, tandis que leurs largeurs sont directement liées aux constantes de décroissance modales.

L'identification de ces paramètres constitue cependant un problème inverse difficile. Les fortes corrélations entre paramètres, la présence de minima locaux, les problèmes d'identifiabilité ainsi que le bruit statistique rendent les méthodes classiques d'ajustement souvent peu robustes. Le développement de stratégies d'estimation fiables représente ainsi un enjeu important pour l'exploitation des mesures de bruit neutronique sur les installations expérimentales.

L'objectif du stage est de développer et d'évaluer des méthodes robustes d'identification des paramètres intervenant dans les modèles spectraux du bruit neutronique, aussi bien pour les formulations classiques de Cohn- α et Rossi- α que pour leurs extensions multi-

modales intégrant les effets spatiaux.

Le travail débutera par une étude théorique des propriétés d'identifiabilité de ces modèles. Une attention particulière sera portée aux corrélations entre paramètres, au conditionnement des problèmes d'estimation. Cette analyse pourra s'appuyer sur des outils tels que l'étude du Jacobien, les profils de vraisemblance, les décompositions en valeurs singulières ou encore l'analyse de la géométrie des fonctions coût.

Dans un second temps, différentes stratégies d'estimation seront développées et comparées : reparamétrisations réduisant les corrélations, régularisation, optimisation hiérarchique, méthodes globales (Differential Evolution, CMA-ES, Basin Hopping, Dual Annealing) et approches hybrides combinant optimisation globale et locale.

Les méthodes proposées seront évaluées sur des données synthétiques issues de simulations Monte Carlo de bruit neutronique, puis appliquées aux modèles de Rossi- α , Cohn- α classique et aux formulations multi-modales développées au laboratoire. Les performances seront comparées en termes de précision, robustesse, sensibilité au bruit statistique, dépendance aux conditions initiales et coût de calcul. Les développements réalisés ont vocation à être intégrés aux outils d'analyse du bruit neutronique du laboratoire en vue d'applications expérimentales.

■ Formation souhaitée :

- Master 2
- Dernière année d'école d'ingénieur

Domaine : Génie nucléaire,
Physique mathématique,
Data science scientifique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, algèbre linéaire,
analyse numérique,
neutronique

■ Mots clés :

bruit neutronique, analyse
modale, identifiabilité, optimisation
non linéaire,

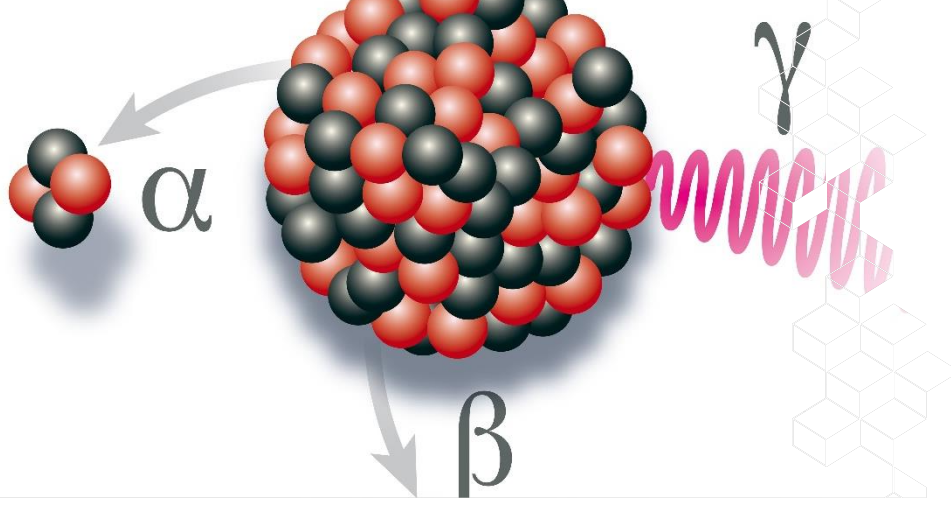
■ Possibilité de thèse :

NON

■ Contact :

TRUCHET Guillaume
Guillaume.truchet@cea.fr





Recherche de chaînes d'évolution simplifiées appliquées à l'estimation de la puissance résiduelle

DER/SPRC/LPN

Ce stage vous offrira l'opportunité de découvrir le cycle du combustible des réacteurs à eau pressurisée en mettant en œuvre une démarche de R&D. Vous vous approprierez les outils et les données nucléaires essentiels à l'évaluation d'une des grandeurs clés du cycle, la puissance résiduelle. Votre objectif sera de répondre à un enjeu de réduction des coûts de calcul, dans une démarche d'optimisation et d'industrialisation des processus.

La puissance résiduelle constitue une grandeur fondamentale pour l'exploitation optimale d'un réacteur nucléaire ainsi que pour la sûreté du combustible durant l'intégralité de son cycle. Issue essentiellement de la désintégration des produits radioactifs présents dans le réacteur, la puissance résiduelle subsiste après l'arrêt de la réaction en chaîne. Elle intervient dans le dimensionnement des systèmes de refroidissement et représente un paramètre à considérer lors des phases d'arrêt, de maintenance et de manutention. Par ailleurs, elle joue un rôle déterminant dans la conception des systèmes de transport, de stockage et d'entreposage du combustible.

Ainsi, les situations où la valeur de la puissance résiduelle constitue un paramètre essentiel sont nombreuses et impliquent des calculs complexes. Il apparaît donc judicieux d'optimiser le coût computationnel associé. Les méthodes de référence actuelles s'appuient sur des chaînes d'évolution intégrant les données de milliers d'isotopes. Réduire le nombre d'isotopes permettrait de diminuer la quantité de données utilisées pour estimer la puissance résiduelle, et par conséquent, de limiter le coût de calcul.

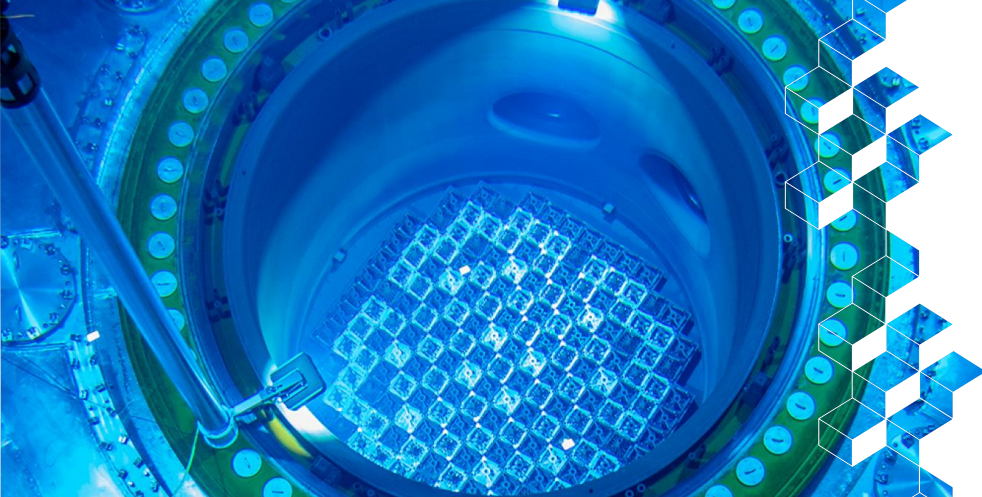
L'objectif de ce stage est donc de proposer des chaînes d'évolution réduites qui permettent de répondre précisément à l'estimation de la puissance résiduelle tout en limitant le nombre d'isotopes nécessaires. Cette étude sera réalisée sur le code d'évolution MENDEL, développé au sein du CEA.

Il vous sera ainsi demandé de vous familiariser avec les outils de calcul utilisés au sein du laboratoire (MENDEL, DARWIN/PEPIN2), analyser les isotopes d'intérêts majeurs pour la puissance résiduelle, quantifier l'intérêt computationnel d'une condensation des chaînes d'évolution, identifier et mettre en œuvre la manière la plus appropriée de diminuer le coût de calcul en accordance avec l'étape précédente.

Ce stage aura lieu au sein du Laboratoire de Projets Nucléaires. Pour assurer son bon déroulement, le candidat ou la candidate devra disposer de solides compétences en informatique scientifique (notamment en Python), d'une bonne maîtrise des systèmes Unix/Linux ainsi que de connaissances en physique des réacteurs et données nucléaires.

- **Formation souhaitée :**
École d'ingénieur ou Master 2
Intérêt pour la physique des réacteurs et la simulation
- **Durée du stage :**
6 mois
- **Méthode/logiciel(s):**
Unix/Linux, Python, Code d'évolution
- **Mots clés :**
Neutronique, Puissance résiduelle, REP, données nucléaires
- **Possibilité de thèse :**
Non
- **Contact :**
DA CUNHA Dorian
dorian.dacunha@cea.fr





Ajustement des coefficients de diffusion à l'aide des flux du transport

DER/SPRC/LPN

Ce stage vous permettra de contribuer à l'amélioration des outils de calcul neutroniques utilisés pour la conception des petits réacteurs à eau pressurisée. Au sein d'une équipe dynamique, vous explorerez les opportunités offertes par une amélioration d'un standard industriel : le calcul neutronique 3D dans l'approximation de la diffusion

Les schémas de calcul neutronique à visée industrielle sont conçus pour offrir un compromis pertinent entre précision et temps de calcul. Une approximation couramment utilisée est l'approximation de la diffusion. Il s'agit de la loi de Fick pour les neutrons. L'utilisation de cette approximation soulève plusieurs enjeux, notamment la détermination des coefficients de diffusion.

Les schémas de calcul industriels sont organisés autour de deux étapes. Une étape « réseau » lors de laquelle le transport des neutrons est résolu très finement sur une fraction de la géométrie, et une étape cœur lors de laquelle l'approximation de la diffusion est utilisée sur la géométrie 3D du cœur entier. L'étape réseau permet d'estimer des grandeurs moyennées utilisées pour la résolution de l'équation de la diffusion. L'expérience montre que le calcul en diffusion sur la géométrie du calcul réseau ne permet pas de retrouver les principales grandeurs neutroniques. Un calcul d'équivalence est alors classiquement mené pour corriger les écarts. Ce sujet de stage explore une autre voie: l'adaptation des coefficients de diffusion.

Le Laboratoire de Projets Nucléaires (LPN), au sein de la Direction des Energies du CEA, est en charge du développement et de la validation

des outils de calcul scientifique neutroniques dédiés aux petits réacteurs. Ces OCS suivent progressivement l'évolution des capacités offertes par les solveurs existants, et l'évolution des besoins de précision et de temps de calcul. Cette évolution des outils accompagne celle des méthodologies d'étude qui garantissent des réacteurs plus sûrs et plus efficaces.

Le travail attendu pour ce stage consiste à mettre en place le calcul de l'écart entre le résultat attendu de la loi de Fick, et celui estimé à partir d'un jeu de coefficient de diffusion et de flux. Une méthode d'ajustement sera alors utilisée pour estimer les coefficients de diffusion. Une fois un jeu de coefficient de diffusion estimés, des calculs de diffusion en cœur entier seront menés ainsi que des calculs Monte-Carlo. Les résultats des calculs en diffusion menés avec les coefficients de diffusion ajustés ou ordinaires seront comparés aux résultats du calcul Monte-Carlo. Un travail similaire a déjà été mené sur des réacteurs CANDU en 2016 (Ashlea V. K. Colton, 2016, University of Ontario Institute of Technology). L'étudiant prêtera une attention particulière aux temps de calcul, et étudiera la possibilité d'utiliser des coefficients de diffusion directionnels.

■ Formation souhaitée :

MASTER2 / 3^{ème} année
d'école d'ingénieur

Une formation dans le
domaine du nucléaire est un
plus

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Système d'exploitation:
Unix/Linux Langage
informatiques: Python

■ Mots clés :

Neutronique, diffusion,
schéma de calculs, Monte-
Carlo, jumeau numérique

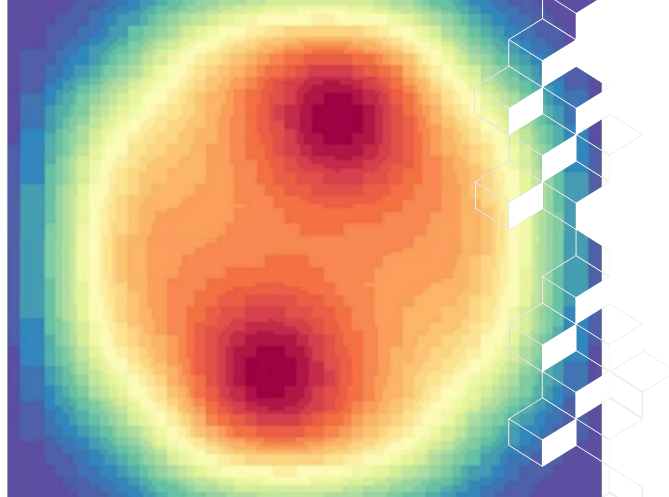
■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

DU BUAT VICTOR
victor.dubuat@cea.fr





Mise en place d'un schéma hétérogène neutronique-thermohydraulique

DER/SPRC/LPN

NARVAL3 est un Outil de Calcul Scientifique (OCS) industriel permettant la modélisation et la simulation multiphysique de réacteurs nucléaires. Deux résolutions (neutronique et thermohydraulique) sont couplées afin de simuler le comportement du réacteur. Le stage porte sur le développement d'un calcul couplé à une échelle plus fine que le schéma actuel afin de produire une solution de référence et d'étudier l'impact de l'ébullition sur le comportement (neutronique et thermohydraulique) du réacteur.

L'Outil de Calcul Scientifique NARVAL3, développé au CEA/DES, permet la modélisation neutronique et thermohydraulique de cœurs compacts. La résolution de la neutronique est basée sur le code APOLLO3® (réseau et cœur), celle de la thermohydraulique sur le code THEDI ; la communication entre ces deux codes dans l'environnement NARVAL3 permet de prendre en compte les effets de la thermohydraulique du cœur sur sa neutronique. La contrainte industrielle imposant des objectifs de performance, la résolution des équations neutroniques et thermohydrauliques est effectuée à une échelle « grossière »

A l'issue d'un stage précédent (« Modélisation raffinée d'un assemblage thermohydraulique et calcul de REC avec l'OCS NARVAL3), une modélisation à l'échelle canal d'un assemblage a été développée ; ce schéma 'thermohydraulique raffiné' ne permet pas encore d'opérer un retour d'information complet vers la neutronique (discretisation géométrique différente, paramétrisation des sections efficaces avec des champs de densités/températures uniformes). L'objectif du stage porte sur l'élaboration d'un calcul couplé à une échelle plus détaillée dans le but :

- d'établir des calculs de référence en situation nominale (tout hétérogène) ;
- de générer des données d'entrée pour des calculs thermiques 3D à l'échelle sous-canal ;
- de réaliser des études phénoménologiques lors de transitoires de type 'retrait intempestif d'aborbants'. Celles-ci nécessiteront le module de cinétique de NARVAL3.

Pour ce faire, un travail important sur la génération des sections efficaces (partie réseau) est à prévoir, permettant de générer les points de fonctionnement nécessaires à l'interpolation des sections efficaces pour un calcul neutronique prenant en compte les distributions fines de densité / température au sein d'un assemblage. Cette méthodologie sera particulièrement impactante pour des situations présentant de grandes bascules thermiques, *a fortiori* pour des situations partiellement diphasiques.

Le/la stagiaire devra mettre en place des procédures, dans l'environnement NARVAL3, pour générer les bibliothèques de sections efficaces monophasiques (partie réseau) ; le paramétrage pour les situations diphasiques sera étudié dans un second temps. Le/la stagiaire devra s'assurer de la bonne communication des grandeurs d'intérêt entre la neutronique (partie cœur) et la thermohydraulique.

Une bonne maîtrise du langage python et du gestionnaire de version GIT est demandée ; le stage sera réalisé sous environnement LINUX. Les notions fondamentales de neutroniques, thermohydraulique et physique des réacteurs seront indispensables

■ Formation souhaitée :

Formation ingénieur (ou équivalent universitaire) en neutronique / thermohydraulique / physique des réacteurs

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python / architecture logicielle

GIT / Linux

■ Mots clés :

Neutronique –
Thermohydraulique –
physique des réacteurs

■ Possibilité de thèse :

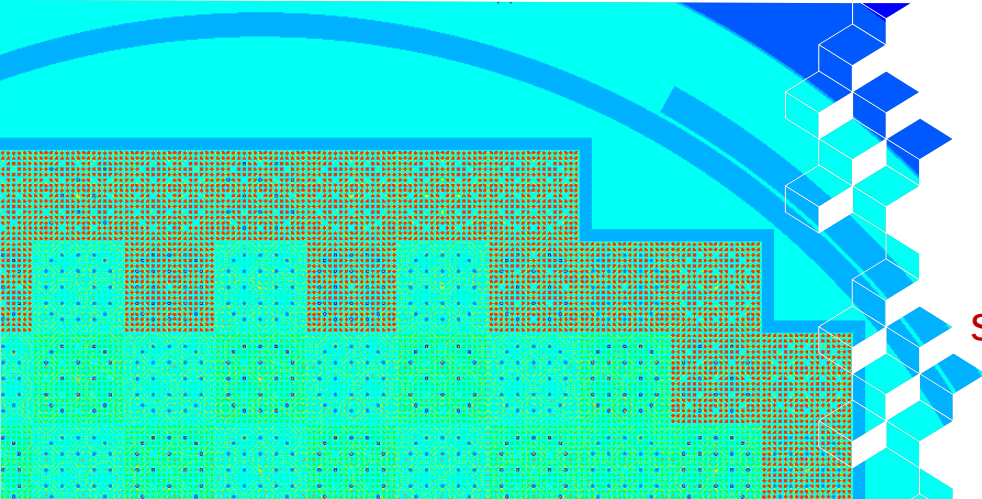
Non

■ Contact :

Adrien Fayet / Martin Foissy

adrien.fayet @cea.fr
martin.foissy@cea.fr





Développement d'un modèle de calcul cœur REP pour l'évolution de sources neutroniques de démarrage

DER/SPRC/LPN

Ce stage vous permettra de contribuer à la mise au point d'un schéma de calcul à l'interface entre calcul scientifique, analyse physique des sources neutroniques, compréhension du fonctionnement d'un cœur REP, avec des applications directes à la conception de sources neutroniques de démarrage.

Les sources neutroniques de démarrage sont des objets introduits en réacteur jouant un rôle crucial en matière de sûreté nucléaire. Elles garantissent la surveillance permanente de l'état sous critique d'un cœur et assurent ainsi la prévention d'accidents de réactivité lors des phases d'arrêt du réacteur et de chargement/déchargement du combustible.

L'évolution des sources neutroniques de démarrage recouvre la transformation de sa matière émissive lors de son irradiation dans un cœur de réacteur. Les isotopes responsables de l'émission neutronique de la source sont progressivement consommés par fission ou par captures radiatives, donnant naissance à de nouveaux éléments. Il est donc essentiel de modéliser cette évolution, à la fois pour évaluer la performance des sources – en particulier leur émissivité neutronique au cours d'un cycle d'irradiation – et pour estimer des paramètres de sûreté associés tels que les échauffements nucléaires.

L'enjeu de ce stage est de développer un schéma de calcul permettant de modéliser l'évolution des sources neutroniques de démarrage sous irradiation. Ce schéma devra permettre de suivre l'évolution

isotopique de la matière émissive et d'en déduire les grandeurs d'intérêt.

A terme, l'objectif est de disposer d'un outil suffisamment robuste et prédictif pour être utilisé dans la conception de sources neutroniques de démarrage et pour l'interprétation de programmes expérimentaux.

Les missions qui vous seront confiées sont les suivantes :

- Prendre en main les outils de calcul neutronique du CEA (APOLLO3, DARWIN/PEPIN2, TRIPOLI-4®) ;
- Poursuivre et approfondir les développements initiés en 2026 ;
- Réaliser des calculs d'évolution de sources neutroniques de démarrage sur des géométries 3D d'un cœur REP afin d'évaluer les grandeurs d'intérêt associées à l'objet ;
- Vérifier et valider le schéma de calcul à partir de cas tests et de résultats de référence ;
- Documenter les travaux réalisés et les résultats obtenus.

Vous réaliserez ce stage au sein du Laboratoire de Projets Nucléaires qui est en charge de la conception neutronique de sources de démarrage.

■ Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2

Intérêt pour la physique des réacteurs et la simulation

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Unix/Linux, Python, code de transport Monte-Carlo

■ Mots clés :

Neutronique, physique des réacteurs, sources neutroniques

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

BEN-YELLES Anis
anis.benyelles@cea.fr



D é p a r t e m e n t d e T e c h n o l o g i e N u c l é a i r e

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 post doc, CDD OD ou ATA, 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).



Nuclear Technology Department

The Department of Nuclear Technology (DTN) is an R&D unit whose mission is to improve the technology of current nuclear reactors and develop that of future reactors by:

- Studying, designing, and conducting qualification tests on reactor components (assemblies, devices...),
- Studying the behavior and performance of coolants,
- Developing instrumentation for reactor monitoring, process control, and nuclear measurement,
- Modeling radionuclide transfer in the environment and reactors,
- Studying severe accidents.

The DTN, which has around 250 employees (including 200 permanent staff, 30 PhD students, post-docs, temporary contracts, apprentices, and interns), is organized into two services:

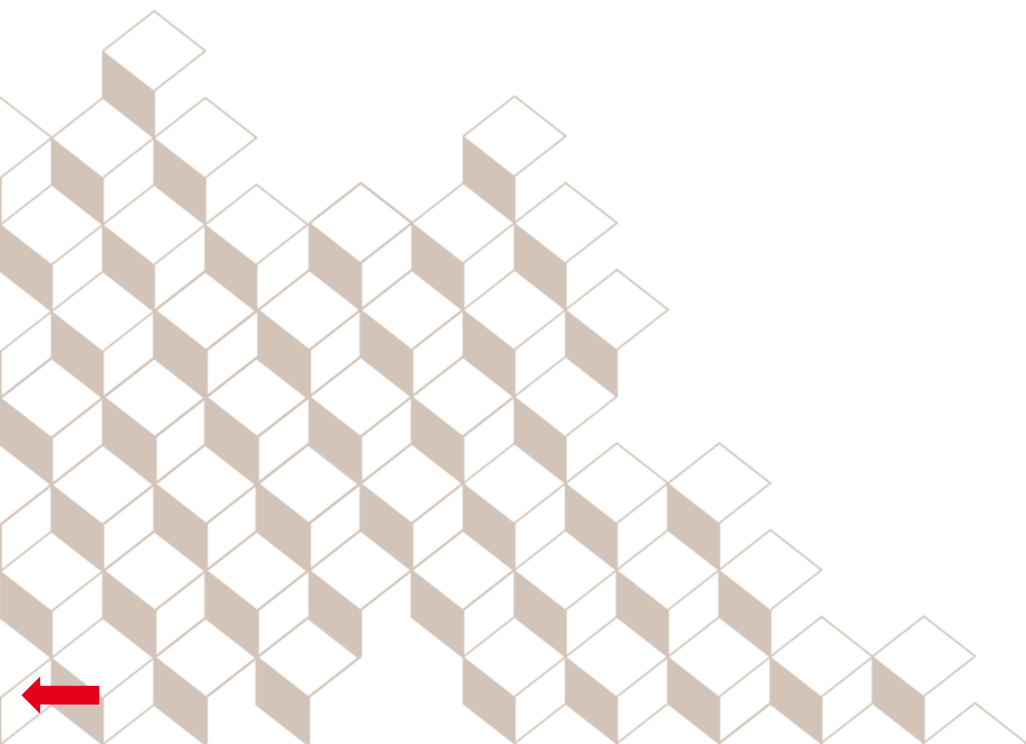
- The Severe Accidents and Transfer Modeling Service (SMTA),
- The Components and Process Technology Service (STCP).

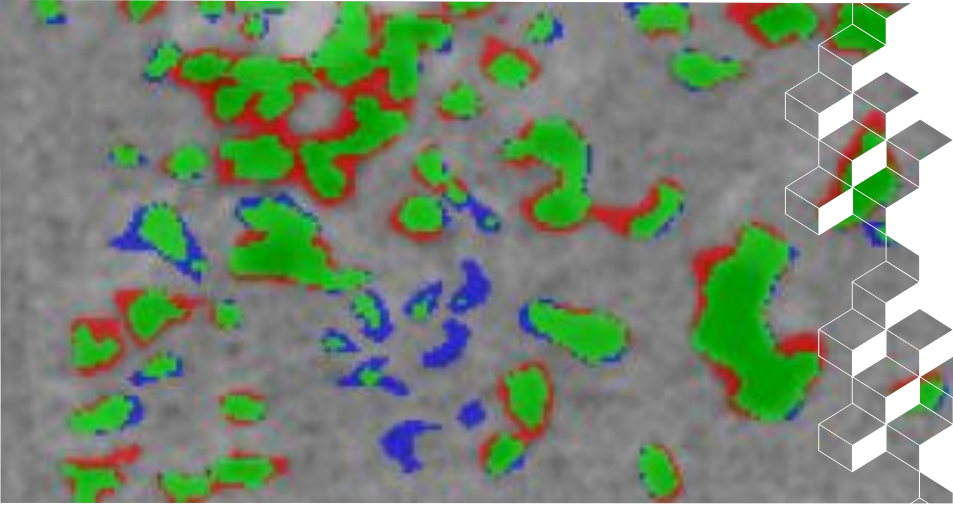


S M T A

Service mesures et
modélisation des
transferts et des
accidents graves

*Transfer and Severe Accident
Modelling Unit*





Utilisation d'outils de Deep Learning/Computer Vision pour analyser les images radioscopiques d'un mélange triphasique

DTN/SMTA/LMAG

Stage M2 de traitement et d'analyse d'images issues de radioscopies X de mélanges triphasiques. Mise en œuvre de méthodes de traitement d'images, de computer vision, de clustering et d'apprentissage.

Durant un accident grave le cœur se dégrade et du corium à 3000 K (un magma de combustible et d'éléments de structure issus de la fusion du cœur du réacteur) peut se former, se relocaliser et interagir avec son environnement, tel qu'un réfrigérant liquide, l'acier de la cuve ou le béton du radier.

Le travail du stage sera réalisé dans le cadre de l'interaction corium-eau et des essais réalisés sur l'installation expérimentale KROTOS. KROTOS dispose d'un système de radioscopie X permettant la visualisation de l'évolution des mélanges de corium, eau et vapeur d'eau.

Un outil, SPECTRA, a été développé sous Matlab pour extraire des images X des données quantitatives des différents phases. L'outil permet une caractérisation de la taille et vitesse du jet de corium, la taille des gouttes formées de sa fragmentation et la quantité de vapeur d'eau générée.

Ces dernières années un travail d'exploration de techniques modernes de computer vision, basées ou non sur de l'apprentissage, a été effectué pour les tâches de débruitage des images, segmentation des images débruitées et classification en 3 classes (corium,

eau et vapeur) des images segmentées. Ce travail a été réalisé sur un essai KROTOS.

L'objectif de ce stage est de continuer ce travail exploratoire en se concentrant sur la segmentation des images et plus particulièrement sur l'identification de la vapeur. Diverses pistes d'amélioration sont envisagées : travailler sur des méthodes de masquage du corium, augmenter la base d'apprentissage en ajoutant les images d'autres essais, travailler sur les critères d'apprentissage et sur les métriques de mesure des performances et mettre en œuvre des modèles de segmentation adéquats.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre : prise en main des travaux précédemment réalisés, connaissance de l'état de l'art en matière d'algorithmes d'analyse d'image et de deep learning.

Equipe d'accueil : Le Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves de l'institut IRESNE au CEA Cadarache, travaille sur la modélisation et la simulation numérique des accidents graves et, en particulier, du comportement du corium de sa génération à sa propagation et son interaction avec l'environnement.

■ Formation souhaitée :

3ème année École d'Ingénieur ou Master 2 traitement du signal, data science, computer vision, IA

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Matlab, SPECTRA

■ Mots clés :

ICE, segmentation, classification, non supervisé, Computer Vision

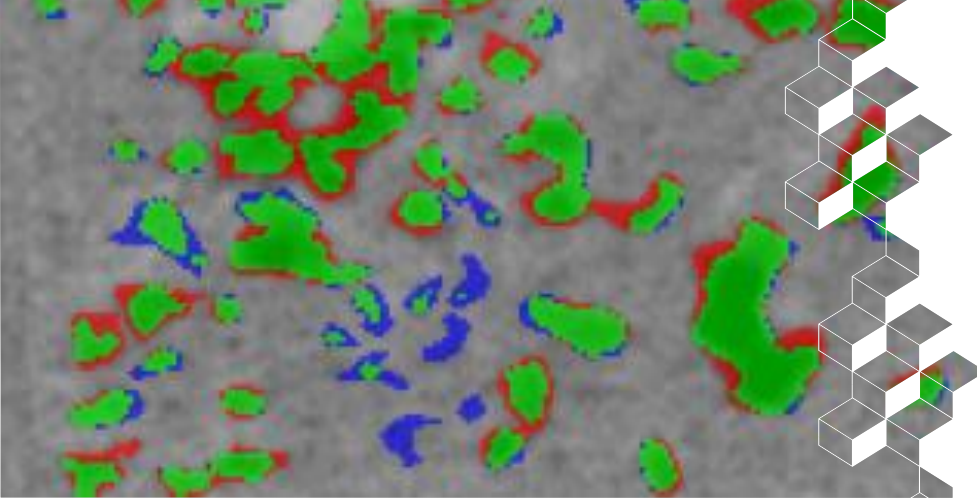
■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

BRAYER Claude
claude.brayer@cea.fr





Use of Deep Learning and Computer Vision tools to analyse radiographic images of a three-phase mixture

DTN/SMTA/LMAG

M2 internship in image processing and analysis from X-ray images of three-phase mixtures. Implementation of image processing, computer vision, clustering and learning methods.

During a severe accident, the core degrades and corium at 3000 K (magma comprised of molten fuel and structural materials) forms. The corium relocates through the degraded core and interacts with its environment (coolant, reactor vessel, basemat concrete, etc.).

The internship will be carried out in the context of corium-water interaction and tests performed on the KROTOS experimental facility, which is equipped with an X-ray imaging system for visualising mixtures of corium, water and steam.

A tool, SPECTRA, has been developed in Matlab to extract quantitative data from X-ray images of the different phases. The tool enables characterization of the size and speed of the corium jet, the size of the droplets formed from its fragmentation, and the amount of steam generated.

In recent years, an exploration of modern computer vision techniques, both learning-based and non-learning-based, has been conducted for tasks such as image denoising, segmentation of denoised images, and classification of segmented images into 3 classes (corium, water, and steam). This work was carried out on a KROTOS test.

The objective of this internship is to continue this exploratory work by focusing on image segmentation, particularly the identification of steam. Various improvements to the existing methods are under consideration including different approaches for generating the masks used for training, expanding the training dataset using images from multiple comparable experiments, refining the learning criteria and performance metrics, and implementing alternative segmentation architectures.

Skills to be acquired and developed: (1) knowledge of the state of the art in image analysis and deep learning algorithms, (2) working as an independent researcher.

Host scientific team: The LMAG (Severe Accident Modelling Laboratory) of the IRESNE Institute at CEA Cadarache works on the modelling and numerical simulation of severe accidents and, in particular, the behaviour of corium from its generation to its propagation and interaction with the environment.

■ Formation souhaitée :

3rd year of Engineer school or M2 signal processing, data science, computer vision, AI

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Matlab, SPECTRA

■ Mots clés :

ICE, segmentation, classification, non supervised, Computer Vision

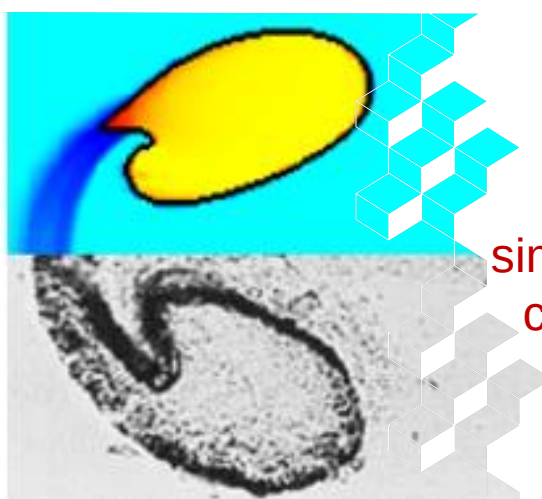
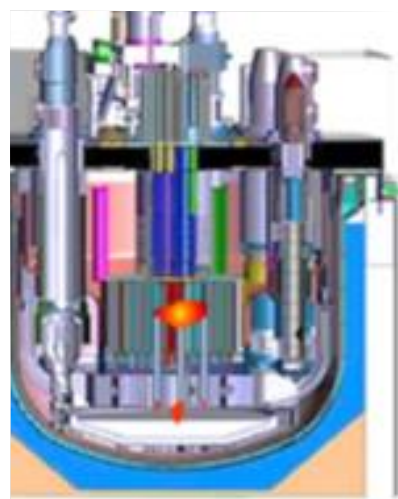
■ Possibilité de thèse :

no

■ Contact :

BRAYER Claude
Claude.brayer@cea.fr





Développement d'un schéma MUSCL pour la simulation des écoulements compressibles multifluides

DTN/SMTA/LMAG

Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement et de l'amélioration des méthodes numériques utilisés pour la simulation des écoulements compressibles multiphasiques. Dans ce contexte, l'amélioration de la précision des schémas numériques et la réduction de la diffusion numérique constituent des enjeux importants, notamment pour la simulation d'écoulements présentant de forts gradients ou des interfaces entre plusieurs fluides. Le code SCONE, développé au LMAG sur la base de la plateforme open-source TRUST, utilise des méthodes numériques adaptées à la simulation de ces écoulements. Ce stage vise à étudier et à mettre en œuvre un schéma MUSCL [1] [2] sur maillage décalé afin d'améliorer la précision de la discrétisation des équations.

Le Centre CEA de Cadarache (13) est dédié à la recherche sur les énergies nucléaires et bas carbone. Au sein de l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone (IRESNE), le Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (LMAG) mène des activités de recherche portant sur la simulation numérique des phénomènes associés aux accidents graves, notamment à l'aide de codes de calcul multiphysiques tels que SCONE. Le stage s'effectuera au sein du LMAG.

L'objectif de ce stage est de développer et de valider un schéma MUSCL sur maillage décalé pour améliorer la précision de la résolution des écoulements compressibles multifluides. Dans un premier temps, le schéma MUSCL sera appliqué aux équations scalaires de masse et d'énergie interne du multifluide à six équations en isopression.

Un premier axe consistera à réaliser une étude bibliographique sur les méthodes MUSCL pour les formulations monofluides, puis sur leur extension aux écoulements compressibles multifluides. Le schéma étudié sera ensuite implémenté dans un code 1D en C++ disponible au laboratoire, permettant de résoudre les équations d'Euler pour un écoulement compressible multifluide à partir d'un schéma à six équations en isopression.

Une attention particulière sera portée à la reconstruction des grandeurs utilisées aux interfaces. Une première approche, qui consiste à reconstruire directement la quantité $\alpha\rho$, pourra être comparée à une approche dans laquelle α et ρ sont reconstruites séparément à l'aide de limiteurs adaptés, puis combinées pour reconstruire $\alpha\rho$.

L'implémentation sera ensuite validée sur différents cas tests 1D, notamment des problèmes d'advection de fonctions continues et discontinues à vitesse constante et potentiellement des cas de tube à choc. Une étude de convergence en maillage permettra de comparer les résultats obtenus avec et sans le schéma MUSCL, d'évaluer l'ordre de précision et de quantifier son influence sur la diffusion numérique. Les différentes stratégies de reconstruction de $\alpha\rho$ pourront également être comparées sur ces cas tests.

Une fois le schéma validé dans le code 1D, son intégration dans SCONE pourra être envisagée suivant l'avancement du stage. Cette étape permettra d'évaluer le comportement du schéma dans l'environnement de calcul de SCONE, et d'étudier son influence sur la précision et la diffusion numérique des simulations.

Le stagiaire devra réaliser une étude bibliographique, développer et intégrer un schéma numérique en C++, réaliser des cas tests et analyser les résultats obtenus. Le stage nécessitera des connaissances en méthodes numériques, en programmation C++ et en mécanique des fluides.

[1] B. van Leer, Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method, JCP, 1979

[2] Goudon, T., Llobell, J., & Minjeaud, S. (2020). An explicit MUSCL scheme on staggered grids with kinetic-like fluxes for the barotropic and full Euler system. Communications in Computational Physics, 27(3), 672-724

■ Formation souhaitée :

3ème année d'école d'ingénieur ou Master 2

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

SCONE (basé sur TRUST, C++), Python, Jupyter Notebook

■ Mots clés :

Méthodes numériques, Programmation C++, Simulation, Ecoulement multiphase

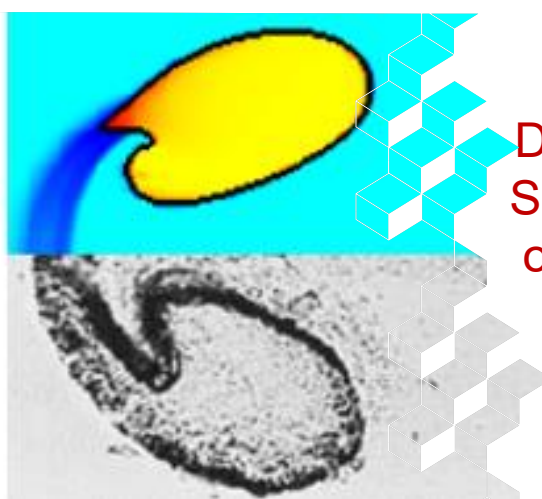
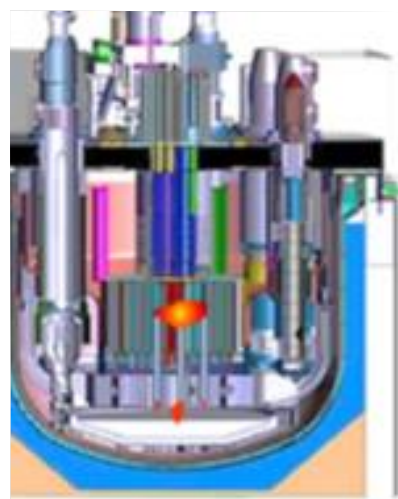
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

jerome.francescatto@cea.fr
kevin.pons@cea.fr
jacques.zhu@cea.fr





Development of a MUSCL Scheme for the Simulation of Compressible Multifluid Flows

DTN/SMTA/LMAG

This work is part of the development and improvement of numerical methods used for the simulation of compressible multiphase flows. In this context, improving the accuracy of numerical schemes and reducing numerical diffusion are important challenges, particularly for the simulation of flows involving strong gradients or interfaces between several fluids. The SCONE code, developed at LMAG based on the open-source TRUST platform, uses numerical methods adapted to the simulation of such flows. This internship aims to study and implement a MUSCL scheme [1] [2] on a staggered grid in order to improve the accuracy of the discretization of the governing equations.

The CEA Cadarache Center (13) is dedicated to research on nuclear and low-carbon energy. Within the Institute for Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), the Severe Accident Modeling Laboratory (LMAG) conducts research activities focused on the numerical simulation of phenomena associated with severe accidents, in particular using multiphysics simulation codes such as SCONE. The internship will take place within LMAG.

The objective of this internship is to develop and validate a MUSCL scheme on a staggered grid to improve the accuracy of the numerical solution of compressible multifluid flows. Initially, the MUSCL scheme will be applied to the scalar mass and internal energy equations of the six-equation isopressure multifluid model.

The first part of the internship will consist of a literature review of MUSCL methods for single-fluid formulations and their extension to compressible multifluid flows. The selected scheme will then be implemented in a 1D C++ code available in the laboratory, which solves the Euler equations for compressible multifluid flows based on a six-equation isopressure model.

Particular attention will be paid to the reconstruction of the quantities at the interfaces. A first approach, consisting in directly reconstructing the quantity q_p , will be compared with an approach in which α and p are reconstructed separately using appropriate slope limiters, and then combined to reconstruct q_p .

The implementation will then be validated on various 1D test cases, including the advection of continuous and discontinuous functions at constant velocity and, potentially, shock-tube problems. A mesh convergence study will be carried out to compare the results obtained with and without the MUSCL scheme, assess the order of accuracy, and quantify its influence on numerical diffusion. The different reconstruction strategies for q_p may also be compared on these test cases.

Once the scheme has been validated in the 1D code, its integration into SCONE may be considered depending on the progress of the internship. This step will make it possible to assess the behavior of the scheme within the SCONE simulation environment and to study its influence on the accuracy and numerical diffusion of the simulations.

The intern will be expected to carry out a literature review, develop and integrate a numerical scheme in C++, perform test cases, and analyze the results obtained. The internship requires knowledge of numerical methods, C++ programming, and fluid mechanics.

[1] B. van Leer, Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method, JCP, 1979

[2] Goudon, T., Llobell, J., & Minjeaud, S. (2020). An explicit MUSCL scheme on staggered grids with kinetic-like fluxes for the barotropic and full Euler system. Communications in Computational Physics, 27(3), 672-724

■ Formation souhaitée :

3ème année d'école d'ingénieur ou Master 2

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

SCONE (basé sur TRUST, C++), Python, Jupyter Notebook

■ Mots clés :

Méthodes numériques, Programmation C++, Simulation, Écoulement multiphase

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

jerome.francescatto@cea.fr
kevin.pons@cea.fr
jacques.zhu@cea.fr



Étude numérique d'un dispositif VITI-MPB : dynamique des bulles et amélioration de la modélisation

DTN/SMTA/LMAG

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des accidents graves des réacteurs nucléaires. Lors de tels accidents, le cœur du réacteur peut fondre et former un liquide à haute température, corrosif, appelé corium. Le CEA est doté de moyens d'essais pour étudier les phénomènes associés, notamment le four à induction VITI et le dispositif VITI-MPB, qui permettent la détermination de propriétés thermophysiques du corium (densité, tension de surface, voir viscosité). Dans ce cadre, la simulation numérique (hydrodynamique diphasique) fournit un outil intéressant pour améliorer l'analyse de ce moyen d'essais complexe. Ce stage s'inscrit dans ce cadre de comparaison simulations-expériences.

Le Centre CEA de Cadarache (13) est dédié à la recherche sur les énergies nucléaires et bas carbone. Au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), le Laboratoire de modélisation des accidents graves (LMAG) mène des activités de recherche portant sur la simulation numérique des phénomènes associés aux accidents graves, notamment à l'aide de codes de calcul multiphysiques tels que SCONE. Le stage s'effectuera au sein du LMAG, en collaboration avec le Laboratoire d'Etude et d'expérimentation des Accidents Graves (LEAG).

L'objectif de ce stage est d'améliorer la simulation numérique du dispositif VITI-MPB (dans le cadre du code SCONE développé au LMAG sur la base de la plateforme open-source TRUST) afin de mieux comprendre les phénomènes de formation et de détachement des bulles. L'étude s'appuiera sur les simulations déjà réalisées pour différents fluides, notamment l'eau salée, l'étain et le corium, ainsi que sur les nombreux résultats expérimentaux disponibles au LEAG.

Un premier axe consistera à analyser et améliorer les simulations existantes afin de réduire les écarts avec les résultats expérimentaux. L'influence de différents paramètres numériques et physiques pourra être étudiée, notamment la modélisation du glissement entre les phases liquide et gazeuse et le coefficient de frottement utilisé pour représenter leur interaction.

Un second axe portera sur l'analyse de la dynamique des bulles et sur la comparaison des grandeurs caractéristiques obtenues numériquement et expérimentalement, telles que la pression maximale, le temps de détachement, la forme des bulles et leur vitesse d'ascension. Des simulations dans un domaine suffisamment étendu suivant la direction verticale pourront être réalisées afin d'étudier l'évolution de la vitesse d'ascension et d'évaluer l'atteinte éventuelle d'une vitesse limite. Ces résultats pourront ensuite être confrontés à la formulation développée au LEAG permettant d'estimer la viscosité à partir de la vitesse d'ascension des bulles. L'influence de la viscosité et des conditions d'injection pourra également être étudiée.

Les résultats numériques seront également comparés aux résultats expérimentaux disponibles, en s'appuyant sur les relations théoriques utilisées pour l'exploitation du VITI-MPB, notamment la correction de Schrödinger pour la détermination de la tension de surface. Cette analyse permettra d'évaluer l'influence de cette correction et de mieux comprendre les écarts entre les résultats numériques et expérimentaux.

Le stagiaire devra exploiter et améliorer le modèle VITI-MPB sous SCONE, réaliser et analyser des simulations numériques et comparer les résultats obtenus aux données expérimentales disponibles. Le stage nécessitera des connaissances en mécanique des fluides, en simulation numérique et en analyse de données.

■ Formation souhaitée :

3ème année d'école d'ingénieur ou Master 2

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

SCONE (basé sur TRUST, C++), Python, Jupyter Notebook

■ Mots clés :

Dynamique des fluides, écoulements multiphasiques, modélisation, simulation CFD

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

jerome.francescatto@cea.fr
romain.le-tellier@cea.fr
hugo.bitard@cea.fr





Numerical study of the VITI-MPB device: bubble dynamics and model improvement

DTN/SMTA/LMAG

This work is part of the study of severe nuclear reactor accidents. During such accidents, the reactor core can melt and form a high-temperature, corrosive liquid called corium. The CEA has experimental facilities to study the associated phenomena, notably the VITI induction furnace and the VITI-MPB device, which allow the determination of thermophysical properties of corium (density, surface tension, and viscosity). In this context, numerical simulation (two-phase hydrodynamics) provides an interesting tool to improve the analysis of this complex testing facility. This internship is part of the framework of comparing simulations with experiments.

The CEA Cadarache Center (13) is dedicated to research on nuclear and low-carbon energies. Within the Institute for Research on Nuclear Systems for Low-Carbon Energy Production (IRESNE), the Severe Accident Modeling Laboratory (LMAG) conducts research activities focused on the numerical simulation of phenomena associated with severe accidents, notably using multiphysics calculation codes such as SCONE. The internship will take place within the LMAG, in collaboration with the Severe Accident Study and Experimentation Laboratory (LEAG).

The objective of this internship is to improve the numerical simulation of the VITI-MPB device (within the framework of the SCONE code developed at the LMAG based on the open-source TRUST platform) to better understand the phenomena of bubble formation and detachment. The study will rely on simulations already carried out for different fluids, notably salt water, tin, and corium, as well as on the numerous experimental results available at the LEAG.

A first axis will consist of analyzing and improving the existing simulations to reduce the discrepancies with the experimental results. The influence of various numerical and physical parameters can be studied, notably the modeling of the slip between the liquid and gaseous phases and the friction coefficient used to represent their interaction.

A second axis will focus on the analysis of bubble dynamics and the comparison of the characteristic quantities obtained numerically and experimentally, such as the maximum pressure, the detachment time, the shape of the bubbles, and their ascent velocity. Simulations in a sufficiently extended domain in the vertical direction can be carried out to study the evolution of the ascent velocity and to evaluate the possible attainment of a limiting velocity. These results can then be confronted with the formulation developed at the LEAG to estimate the viscosity from the ascent velocity of the bubbles. The influence of viscosity and injection conditions can also be studied.

The numerical results will also be compared to the available experimental results, based on the theoretical relationships used for the exploitation of the VITI-MPB, notably the Schrödinger correction for the determination of surface tension. This analysis will make it possible to evaluate the influence of this correction and to better understand the discrepancies between the numerical and experimental results.

The intern will need to exploit and improve the VITI-MPB model under SCONE, carry out and analyze numerical simulations, and compare the results obtained with the available experimental data. The internship will require knowledge in fluid mechanics, numerical simulation, and data analysis.

■ Formation souhaitée :

3ème année d'école d'ingénieur ou Master 2

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

SCONE (basé sur TRUST, C++), Python, Jupyter Notebook

■ Mots clés :

Dynamique des fluides, écoulements multiphasiques, modélisation, simulation CFD

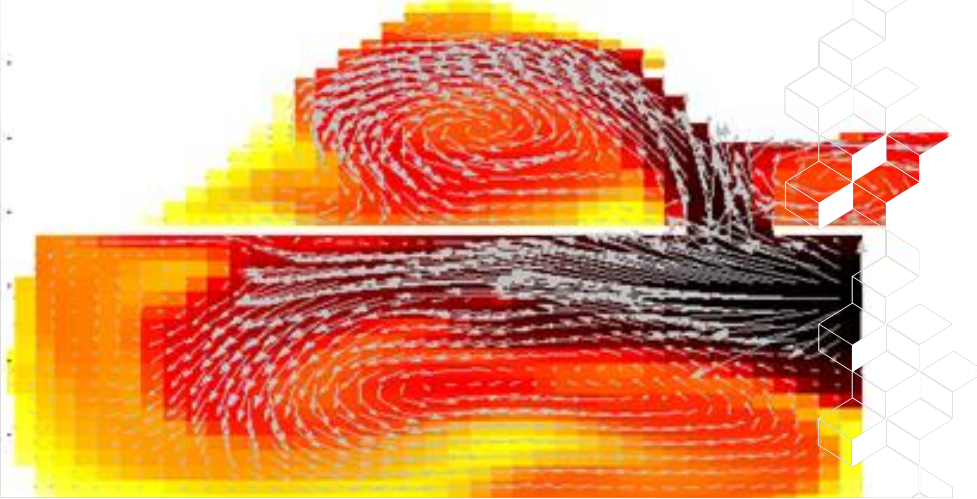
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

jerome.francescatto@cea.fr
romain.le-tellier@cea.fr
hugo.bitard@cea.fr





Automatisation et mise en place d'une base de non régression pour THEMA, code d'étalement du corium, sur la base d'essais expérimentaux et analytiques pour la sûreté des réacteurs nucléaires

DTN/SMTA/LMAG

Le stage portera sur la mise en place d'une base de tests pour la non régression de THEMA, code simulant l'étalement du corium. Cette non-régression devra s'appuyer sur un outil automatisant l'ensemble de la procédure de non-régression. Avoir un code d'étalement du corium qualifié est un enjeu important pour assurer la sûreté lors d'un hypothétique Accident Grave du parc nucléaire français actuel ou celle des futurs EPR/EPR2.

Le LMAG développe, en partenariat avec des industriels et dans le cadre de collaborations internationales, de nombreux codes de calcul permettant de représenter les différentes phases d'un Accident Grave (AG). Lors d'un AG, le cœur du réacteur est amené à entrer en fusion, ce qui conduit à la création d'un magma composite appelé corium.

Dans la dernière séquence de l'AG, le corium est amené à être en contact avec l'enveloppe externe de la centrale composée de béton qui devient alors la dernière barrière de sécurité de la centrale nucléaire.

Le logiciel THEMA simule les phénomènes d'étalement à sec (ou sous une lame d'eau) d'un mélange à haute température (ou corium) avec refroidissement dans un bâtiment réacteur. Il tient compte de la formation de croûtes aux interfaces supérieure et inférieure, ainsi que de l'accroissement de la viscosité lorsque la température devient inférieure à la température de liquidus du corium. Ce code est aussi utilisé par EDF pour valider les études de sûreté lors des visites décennales des centrales nucléaires du parc français. Il peut aussi être utilisé sur l'EPR et EPR2 pour modéliser l'étalement du corium dans la chambre d'étalement ou pour étudier la prolongation de la durée de vie du parc nucléaire français.

Des dispositifs expérimentaux en matériaux simulants ou prototypes sont mis en place afin de réaliser des essais pour alimenter les modèles physiques de THEMA ou valider le comportement du code à partir d'essais intégraux [1, 2].

Dans ce cadre, pour faire de THEMA un outil de calcul scientifique qualifié, une base de tests de non régression basée

sur ces essais à sec et sous eau, complétés par des tests analytiques, est en cours de construction. Cette base de non régression s'appuie sur un outil qui automatise l'exécution des calculs, la comparaison des résultats entre deux versions du code ainsi que la génération d'un rapport.

Ce travail s'appuie sur une première validation de THEMA réalisée sur les essais à sec avec une version du code qui sert, pour l'heure, de version de référence pour ce travail [2].

Le stage consistera à :

- Compléter la base de tests des essais à sec en exécutant les jeux de données associés avec la version actuelle de THEMA et avec la version de référence. Les résultats obtenus entre les deux versions seront comparés entre eux ainsi qu'aux résultats des essais répertoriés dans [2].
- Mettre en place la base de tests analytiques et s'assurer de la pertinence des résultats. Pour ce faire, les sources du code THEMA devront être modifiées, ainsi que les jeux de données de ces tests.
- Prendre en main et adapter/améliorer l'outil d'automatisation pour lancer la non régression

Ce projet sera réalisé sous Linux et nécessite d'avoir des connaissances en physique (mécanique des fluides, thermiques, et/ou physique nucléaire), en informatique (code source en Fortran et outils en Python), et des bases de mathématiques appliquées.

■ Formation souhaitée :

3e année d'École d'Ingénieur en mécanique des fluides

Master 2 Universitaire en mécanique des fluides

■ Durée du stage :

4 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, Fortran, Linux

■ Mots clés :

Thermohydraulique, simulation numérique, CFD, accidents graves, réacteur nucléaire

■ Possibilité de thèse :

non

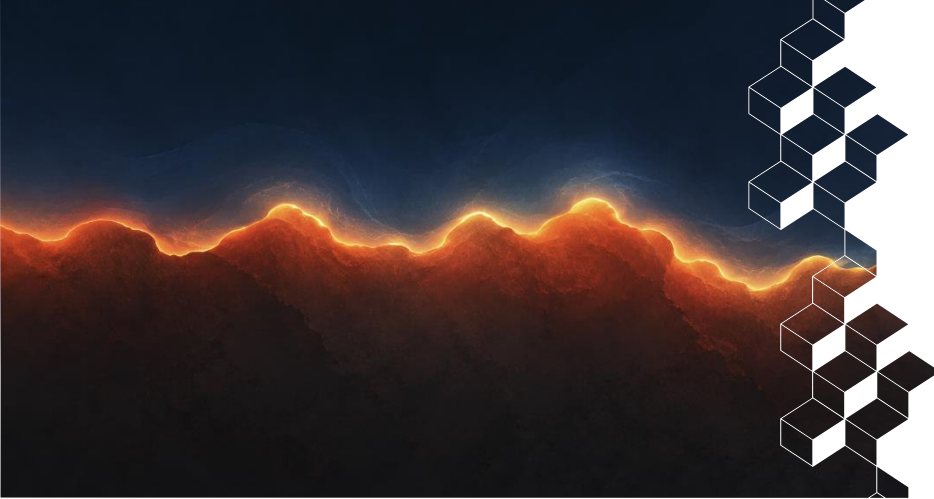
■ Contact :

BIGOT Barbara
barbara.bigot@cea.fr

[1] Spindler & Veteau, *Nuclear Engineering and Design* 236, 415–424, 2006

[2] Spindler & Veteau, *Nuclear Engineering and Design*, 236, 425-441, 2006





Simulation rapide de la fusion d'une paroi : apport du Machine Learning

DTN/SMTA/LMAG

Ce stage vise à accélérer la simulation de la fusion de parois grâce au Machine Learning, en développant des modèles capables de reproduire avec précision les phénomènes de conduction thermique.

Le Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves développe des outils de calcul capables de rendre compte du comportement d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave. Si certains de ces outils visent une description aussi précise que possible des objets et phénomènes impliqués (approche dite « best-estimate »), d'autres outils visent davantage la rapidité de la simulation, de façon à évaluer un grand nombre de scénarios possibles (approche dite « physico-statistique »). Dans cette dernière approche, les choix de modélisation résultent d'un compromis entre précision et coût de calcul.

Dans ce contexte, on cherche à décrire la fusion progressive d'un solide en contact, d'une part, avec du combustible fondu, et d'autre part, avec un réfrigérant. Une des difficultés posées par ce problème réside dans la prise en compte de la conduction thermique à l'intérieur du solide. En effet, une description rigoureuse de cet aspect nécessite la résolution d'une équation aux dérivées partielles issue de la loi de Fourier, jugée trop coûteuse dans le cadre d'une approche physico-statistique. Par ailleurs, des approches plus simples basées sur des hypothèses sur la forme du champ de température s'avèrent trop imprécises dans certaines situations.

L'utilisation du Machine Learning (ML) apparaît alors comme une voie possible pour dépasser cette difficulté. À partir d'un ensemble de simulations numériques « de référence », couvrant de manière représentative le domaine des

paramètres physiques considéré, il s'agit de construire un modèle de substitution capable de reproduire l'évolution du champ de température au cours du temps. Plusieurs stratégies peuvent être envisagées, depuis un apprentissage supervisé à partir des simulations de référence jusqu'à des approches de Physics-Informed Machine Learning (PIML), dans lesquelles les équations physiques, les conditions initiales et les conditions aux limites interviennent directement dans l'apprentissage. Les approches de type Physics-Informed Neural Networks (PINN) constituent notamment une possibilité, sans exclure d'autres architectures ou formulations hybrides.

Intégré à l'équipe de chercheurs du LMAG, vous aurez en charge d'adapter une méthodologie d'entraînement de modèles développée au laboratoire afin d'en étendre le domaine d'applicabilité. Il s'agira notamment d'étudier la représentation des données, le choix des variables d'entrée et de sortie, la stratégie d'apprentissage et, lorsque cela est pertinent, l'introduction de connaissances physiques dans le modèle ou dans sa fonction objectif. Dans un second temps, le modèle entraîné pourra être intégré à un modèle de fusion / solidification de la plateforme numérique PROCOR. Il s'agira enfin d'évaluer le modèle obtenu sur des situations d'intérêt pour le laboratoire, en comparant sa précision, sa robustesse et son coût numérique aux méthodes de référence.

■ Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 universitaire

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python (Numpy, Torch, Pandas), Java (PROCOR)

■ Mots clés :

Machine Learning, Accident Grave

■ Possibilité de thèse :

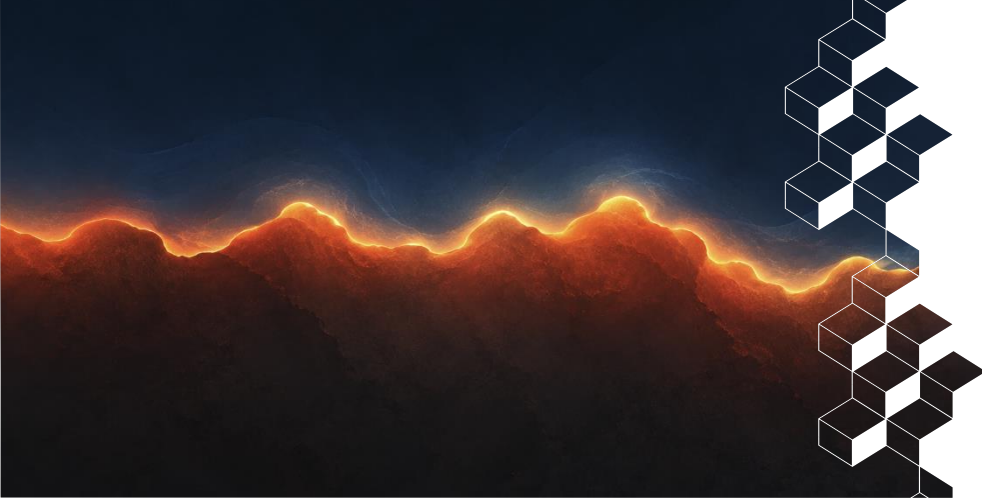
Non

■ Contact :

Rémi Clavier

remi.clavier@cea.fr





Fast simulation of the wall fusion using Machine Learning

DTN/SMTA/LMAG

This internship aims to accelerate the simulation of wall melting through Machine Learning, by developing models capable of accurately reproducing thermal conduction phenomena.

The Severe Accident Modeling Laboratory develops computational tools capable of accounting for the behavior of a nuclear reactor in case of severe accident. While some of these tools aim to provide as accurate a description as possible of the objects and phenomena involved ("best-estimate" approach), other tools aim more at the speed of the simulation, so as to evaluate a large number of possible scenarios ("physico-statistical" approach). In the latter approach, modeling choices result from a compromise between precision and computational cost.

In this context, we seek to describe the progressive melting of a solid in contact with molten fuel on its inner boundary, and with a coolant on its outer boundary. One of the difficulties posed by this problem lies in the consideration of thermal conduction within the solid. Indeed, a rigorous description of this aspect requires the resolution of a partial differential equation (Fourier's law), deemed too costly within the framework of a physico-statistical approach. Moreover, simpler approaches based on assumptions about the shape of the temperature field prove too imprecise in certain situations.

The use of Machine Learning (ML) then appears as a possible way to overcome this difficulty. Based on a set of "reference" numerical

simulations, covering in a representative way the domain of the physical parameters considered, a substitute model capable of reproducing the evolution of the temperature field over time may be constructed. Several strategies can be considered, from supervised learning based on reference simulations to approaches of Physics-Informed Machine Learning (PIML), in which the physical equations, the initial conditions and the boundary conditions intervene directly in the learning. Physics-Informed Neural Networks (PINN) approaches seem particularly interesting, without excluding other architectures or hybrid formulations.

Integrated into the team of researchers at LMAG, you will be in charge of adapting a model training methodology developed in the laboratory in order to extend its scope of applicability. This will notably involve studying the representation of the data, the choice of input and output variables, the learning strategy and, when relevant, the introduction of physical knowledge into the model or into its objective function. In a second step, the trained model could be integrated into a melting/solidification model of the digital platform PROCOR. Finally, the model obtained will be tested on situations of interest to the laboratory, by comparing its precision, robustness and numerical cost with reference methods.

- **Desired formation:**

Ecole d'ingénieur ou Master 2 universitaire

- **Duration:**

6 mois

- **Methods/software:**

Python (Numpy, Torch, Pandas), Java (PROCOR)

- **Key-words:**

Machine Learning, Accident Grave

- **Continuation in Ph.D.**

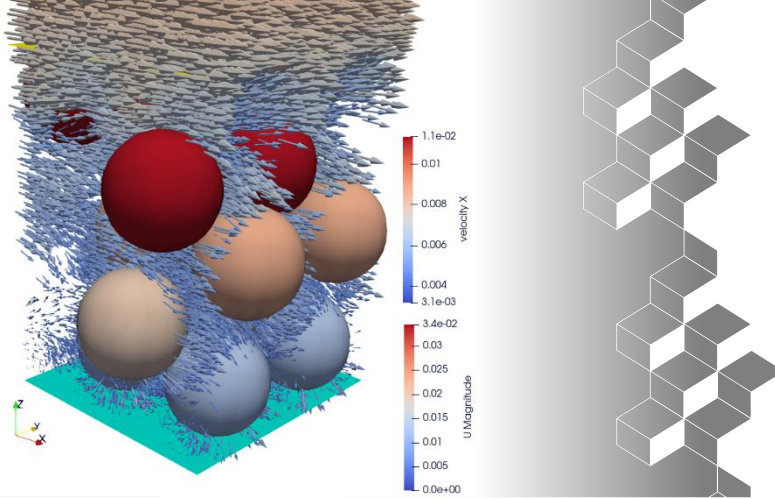
Non

- **Contact:**

Rémi Clavier

remi.clavier@cea.fr





Simulation numérique d'écoulements granulaires immergés (couplage DEM-LBM)

**DTN/SMTA/LMAG
et DEC/SESC/LDOP**

Ce stage a pour but d'étudier numériquement le comportement d'un ensemble de particules entraînées par un écoulement fluide, en support aux études de sûreté sur les accidents graves dans les réacteurs nucléaires de 4^e génération de type RNR-Na.

La déstabilisation d'un milieu granulaire immergé par l'écoulement du fluide en son sein est une thématique d'intérêt pour l'étude du comportement d'un lit de débris de corium formé au cours d'un accident grave dans un Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au Sodium (RNR-Na) de 4^e génération. En effet, ce type d'accident peut amener le cœur du réacteur à entrer en fusion, puis à se relocaliser dans le fond de cuve du réacteur, où il interagit avec le sodium pour former un lit de débris sédimentés sur le récupérateur de corium. Le lit de débris constitue un milieu granulaire immergé dans le sodium liquide, dont l'évolution est couplée à celle du sodium : les débris chauds mettent en mouvement le sodium par convection naturelle et ébullition, et la circulation du sodium peut déstabiliser le lit de débris et provoquer son nivellement progressif.

De par la complexité de ce type de milieu, leur simulation numérique nécessite d'adopter des approches multi-échelles :

- Modèles intégraux pour étudier l'interaction entre le lit dans son ensemble et le reste du réacteur accidenté ;
- Modèles macroscopiques pour capturer les comportements d'ensemble à l'intérieur du lit ;
- Modèles locaux pour caractériser l'interaction entre les débris et le fluide à l'échelle du grain.

Le stage proposé se placera à cette dernière échelle, mais sera également l'occasion de découvrir les travaux précédents du laboratoire menés aux échelles plus larges. Dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (LMAG) et le Laboratoire de Développement des Outils de calcul scientifique combustibles PLEIADES (LDOP), il s'agira de simuler l'interaction entre, d'une part, un ensemble de particules décrit en DEM (Discrete Element Method) et, d'autre part, un fluide décrit en LBM (Lattice-Boltzmann Method). L'outil ExaCold développé au LDOP sera utilisé pour cela.

Après une phase de découverte du sujet et d'appropriation des outils, la démarche proposée est la suivante :

- Construction d'un jeu de données représentant une tranche 3D d'un lit de débris immergé ;
- Conduite de la simulation et étude de la mise en mouvement des particules par le fluide
- Analyse des résultats pour en tirer des lois de comportement macroscopiques pour les modèles à plus grande échelle

En fonction des résultats obtenus et de la motivation du candidat, une thèse pourra être proposée dans la continuité du stage.

■ Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master Universitaire en énergie et/ou mécanique des fluides et/ou mécanique du solide

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

DEM, LBM, ExaCold, linux

■ Mots clés :

Accident Grave, Lit de Débris

■ Possibilité de thèse :

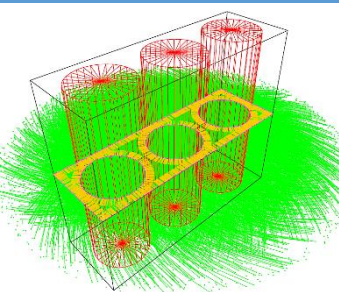
Oui

■ Contact :

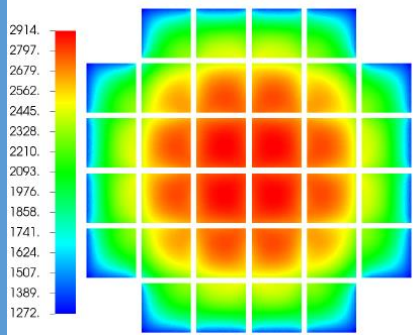
CLAVIER Rémi

remi.clavier@cea.fr





Algorithme Monte-Carlo par lancer de rayons pour le calcul des facteurs de vue pour le rayonnement



Température simulée dans un petit cœur expérimental en conditions accidentelles en tenant compte du rayonnement (au travers du gaz) et de la conduction (dans les solides et le gaz)

Validation numérique de modèles thermiques de rayonnement et de conduction pour évaluer les conséquences de l'assèchement d'un cœur de réacteur

DTN/SMTA/LMAG

Ce stage vise à valider les prédictions des modèles thermiques de conduction et rayonnement d'un outil industriel de calcul d'accident grave (ASTEC) à celles de codes numériques avancés, et de tester les apports d'un prototype de nouveaux modèles physiques pour ASTEC.

Le travail contribuera ainsi à évaluer le domaine de qualification du code industriel.

Le laboratoire LMAG (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves) du CEA travaille sur la modélisation et la simulation numérique des accidents graves. Plus spécifiquement, l'équipe d'accueil de ce stage s'intéresse à quantifier les biais et améliorer les modèles approchés qui prennent en compte les échanges thermiques couplés par rayonnement et conduction dans les codes de calcul employés pour simuler la dégradation des réacteurs. Pour ce faire, divers outils logiciels ont été mis en place pour permettre de réaliser des simulations « de référence » et, ainsi, de quantifier les biais de diverses approximations des modèles.

L'objectif du stage est d'analyser le modèle thermique approché de rayonnement et de conduction d'un code de calcul d'accident grave (ASTEC) utilisé pour évaluer la sûreté des réacteurs nucléaires, et de tester des améliorations pour augmenter la fiabilité du modèle thermique.

Pour cela, les résultats obtenus par le code ASTEC seront comparés, sur des cas-tests simples, à une référence numérique établie par des simulations réalisées avec la plateforme logicielle open-source du CEA TRUST, plus précise mais plus coûteuse en temps de calcul, chaînées avec des évaluations Monte-Carlo de lancer de rayons.

Des modèles programmés en langage Python seront employés pour tester des modèles de

rayonnement approchés alternatifs pour ASTEC.

La méthodologie suivie pour ce travail sera la suivante :

- Appropriation des formalismes des modèles thermique de conduction et de rayonnement et de leurs hypothèses sous-jacentes.
- Formation à l'utilisation des codes de calcul ASTEC, TRUST, et d'un modèle de rayonnement en Python, puis réalisation de calculs comparatifs sur un cas-test simple.
- Montée progressive en complexité de géométrie jusqu'à la réalisation d'un calcul à l'échelle d'un cœur de réacteur nucléaire.

Ce stage participera à la validation des codes numériques contribuant à la démonstration de sûreté des réacteurs, et permettra de proposer des améliorations qualitatives de leurs méthodes physiques.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre au cours du stage : compréhension et analyse de modèles algébriques, simulation numérique dans un environnement d'informatique scientifique, analyse physique de systèmes complexes.

■ Formation souhaitée :

M2/ingénieur en physique, simulation numérique, physique numérique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Linux, Python, codes de simulation numérique (TRUST, et ASTEC)

■ Mots clés :

Transfert thermique radiatif, conduction thermique, simulation numérique, réacteurs nucléaires, accidents, sûreté

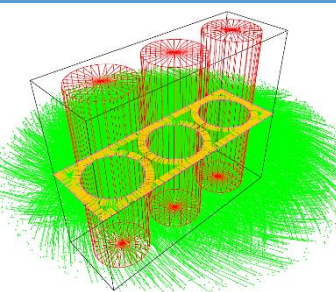
■ Possibilité de thèse :

Non

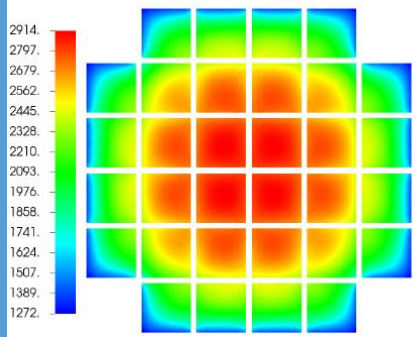
■ Contact :

MANCHON Xavier,
LE TELLIER Romain
xavier.manchon@cea.fr,
romain.le-tellier@cea.fr

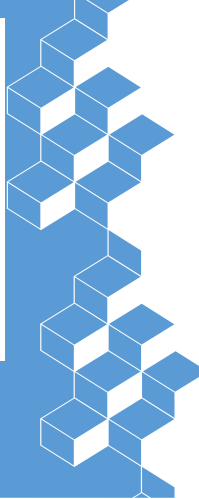




Monte-Carlo ray tracing algorithm for the calculation of view factors for radiation



Simulated temperature in a small experimental core under accident conditions, considering radiation (through the gas) and conduction (in solids and gas)



Numerical validation of thermal radiation and conduction models to assess the consequences of a reactor core drying-out

DTN/SMTA/LMAG

This internship aims to validate the predictions of thermal conduction and radiation models of an industrial severe accident calculation tool (ASTEC) against those of advanced numerical codes, and to test the contributions of a prototype of new physical models for ASTEC.

The work will thus contribute to assessing the qualification domain of the industrial code.

The LMAG laboratory (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves) at the CEA is working on the modeling and numerical simulation of severe accidents. More specifically, the host team for this internship is interested in quantifying biases and improving approximate models that take into account coupled thermal exchanges by radiation and conduction in the calculation codes used to simulate reactor degradation. To this end, various software tools have been implemented to perform "reference" simulations and thus quantify the biases of various model approximations.

The objective of the internship is to analyze the approximate thermal model of radiation and conduction of a severe accident calculation code (ASTEC) used to evaluate the safety of nuclear reactors, and to test improvements to increase the reliability of the thermal model.

For this purpose, the results obtained by the ASTEC code will be compared, on simple test cases, with a numerical reference established by simulations carried out with the CEA's open-source software platform TRUST, which is more precise but more time-consuming, chained with Monte-Carlo ray tracing evaluations.

Python-programmed models will be used to test alternative approximate radiation models for ASTEC.

The methodology followed for this work will be as follows:

- Understanding the formalisms of thermal conduction and radiation models and their underlying assumptions.
- Training in the use of the ASTEC and TRUST calculation codes, and a Python radiation model, followed by comparative calculations on a simple test case.
- Progressive increase in geometric complexity up to the realization of a calculation at the scale of a nuclear reactor core.

This internship will contribute to the validation of numerical codes contributing to the safety demonstration of reactors, and will allow for qualitative improvements in their physical methods.

Skills to be acquired, developed, and implemented during the internship: understanding and analysis of algebraic models, numerical simulation in a scientific computing environment, physical analysis of complex systems.

■ Formation souhaitée :

Master's degree (M2) or engineering degree in physics, numerical simulation, and computational physics

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Linux, Python, numerical simulation tools (TRUST, et ASTEC)

■ Mots clés :

Thermal radiation transfer, thermal conduction, numerical simulation, nuclear reactors, accidents, safety

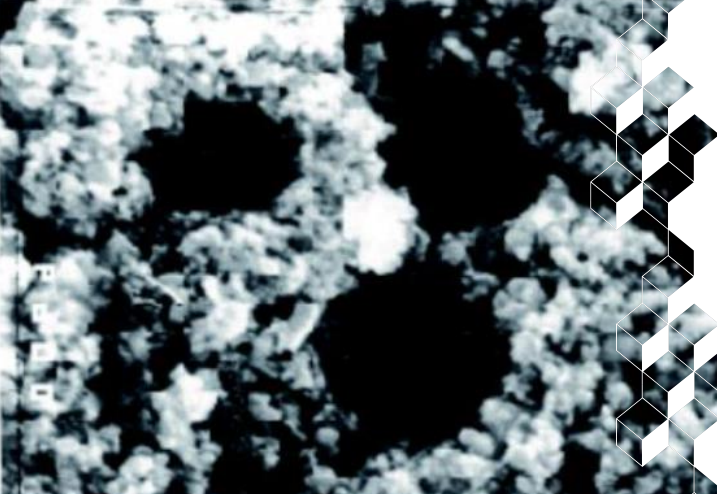
■ Possibilité de thèse :

No

■ Contact :

MANCHON Xavier,
LE TELLIER Romain
xavier.manchon@cea.fr,
romain.le-tellier@cea.fr





Modélisation numérique de la croissance de dépôts poreux en conditions nucléaires: de l'observation microscopique à la génération de géométries 3D réalistes

**DTN/SMTA/LMCT
et DTN/STCP/LTHC**

Vous cherchez à intégrer un laboratoire où l'innovation est un moteur quotidien et où les jeunes talents sont encouragés à expérimenter ? Alors rejoignez nous pour votre stage de fin d'études afin d'étudier les dépôts poreux qui se forment dans les réacteurs nucléaires. A partir de caractérisations par microscopie électronique à balayage, ce sera à vous de développer un modèle numérique 3D de croissance balistique de dépôts poreux, calibré et validé à partir des observations expérimentales du CEA.

L'objectif du stage est d'étudier la morphologie complexe des dépôts poreux qui se forment dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP), au niveau des crayons combustibles, où un régime d'ébullition nucléée sous-refroidie peut s'établir. La modélisation de leur morphologie (rugosité, porosité, etc.) constitue un enjeu pour la compréhension de leur interaction avec les écoulements diphasiques liquide/vapeur. Dans ce contexte, des études menées au CEA/IRESNE ont permis de caractériser des dépôts formés en conditions représentatives de systèmes nucléaires, notamment par microscopie électronique à balayage (MEB).

Au sein de notre laboratoire, vous aurez pour mission de développer un modèle numérique 3D de croissance balistique de dépôts poreux, calibré et validé à partir des observations expérimentales du CEA. Ce stage vous permettra de développer des compétences clés à travers les missions suivantes:

- Réaliser une étude bibliographique des modèles de croissance de dépôts poreux, avec un intérêt particulier pour les approches stochastiques et la croissance balistique;
- Modéliser en Python la croissance balistique 3D permettant de générer des structures poreuses à partir d'une surface initialement lisse;

- Traiter les données expérimentales d'imagerie MEB pour caractériser la géométrie des dépôts ;
- Calibrer les paramètres du modèle et valider ce dernier en confrontant les morphologies simulées aux observations expérimentales;
- Générer des géométries 3D de dépôts poreux par CAO en vue de futures applications en CFD et en fabrication additive.

Ce stage vous permettra de développer vos compétences en modélisation numérique, méthodes stochastiques, en programmation scientifique (Python) et en CAO de géométries 3D complexes. Vous pourrez aussi approfondir vos connaissances en traitement et analyse d'images expérimentales et caractérisation de surfaces rugueuses et poreuses.

Le stage, d'une durée de six mois, se déroulera au CEA IRESNE au sein du LMCT (Laboratoire de Maîtrise de la Contamination et de la Chimie des caloporteurs et du Tritium). Il s'adresse à un(e) étudiant(e) de dernière année d'école d'ingénieur ou de Master 2 spécialisé(e) en mécanique, science des matériaux ou mathématiques appliquées. L'encadrement sera assuré par le Dr Jimmy Martin et le Dr Chloé Cherpain.

■ Formation souhaitée :

Dernière année d'école d'ingénieur ou de Master 2, avec une spécialisation en mécanique, science des matériaux ou mathématiques appliquées

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Logiciel CAO, traitement des images

■ Mots clés :

Dépôts poreux - croissance - balistique - modélisation - 3D

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Dr. Jimmy MARTIN &
Dr. Chloé CHERPIN

jimmy.martin@cea.fr
chloe.cherpain@cea.fr





Développement et qualification de l'application ARODE pour la reconstruction spectrale neutronique avec des sphères de Bonner

DTN/SMTA/LMN

Ce stage vise à poursuivre et consolider le développement de l'application ARODE pour des applications opérationnelles en spectrométrie neutronique avec des sphères de Bonner.

Dans le cadre des activités de spectrométrie neutronique et d'évaluation dosimétrique associées aux systèmes de sphères de Bonner, une application nommée ARODE a récemment été développée sous environnement Python/Jupyter Notebook. Cette application permet la reconstruction de spectres neutroniques à partir des réponses d'un système de 11 sphères de Bonner, en s'appuyant sur un pipeline de déconvolution non linéaire combinant les méthodes de D'Agostini, correction multiplicative et GRAVEL. L'outil intègre également une propagation avancée des incertitudes par bootstrap paramétrique fondé sur une statistique poissonienne des comptages, permettant l'obtention d'intervalles HDI sur les spectres reconstruits et les grandeurs dosimétriques associées.

L'objectif du stage est de transformer cette application de recherche en un véritable outil opérationnel robuste et qualifié utilisable dans un contexte de radioprotection et d'expertise neutronique. Le travail portera notamment sur la consolidation et l'industrialisation du code existant, le développement d'une version exécutable de type .exe, ainsi que la mise en place d'une stratégie complète de validation et de qualification numérique et expérimentale.

Le stagiaire participera en particulier :

- à l'amélioration de l'architecture logicielle de l'application ARODE ;
- au développement d'une interface utilisateur et d'une version exécutable indépendante de Jupyter Notebook ;
- à l'implémentation et l'étude de stratégies de reconstruction spectrale avec un nombre réduit de sphères de Bonner (configuration dégradée ou optimisée) ;
- à l'analyse de la stabilité et des performances du pipeline de déconvolution en fonction du nombre de sphères utilisées ;

- à la mise en place de jeux de simulations neutroniques de référence (avec MCNP ou PHITS, SOURCE4C, CESAR et spectres de compendium AIEA) pour qualifier les performances de reconstruction ;
- à la comparaison des résultats ARODE avec des logiciels de référence existants (type RUFUS) ;
- à la réalisation de benchmarks expérimentaux à partir de mesures réelles effectuées avec le système de sphères de Bonner du SPR ;
- à l'évaluation des performances métrologiques de l'application (stabilité, robustesse, propagation des incertitudes, sensibilité aux statistiques de comptage, influence du bruit de fond, convergence des algorithmes).

Le stage comportera une forte composante :

instrumentation nucléaire, traitement de données, méthodes inverses, calcul scientifique, analyse statistique, développement logiciel scientifique.

Compétences recherchées :

- bonnes bases en physique des rayonnements et/ou neutronique ;
- compétences en programmation Python ;
- intérêt pour les méthodes numériques, statistiques et le traitement de données expérimentales ;
- des connaissances en Monte Carlo neutronique (MCNP ou PHITS) seraient un plus.

Ce stage permettra de contribuer directement au développement d'un outil innovant de spectrométrie neutronique destiné à des applications de radioprotection, de caractérisation de champs neutroniques complexes et d'expertise nucléaire.

■ Formation souhaitée :

Étudiant(e) en Master 2
Physique, Physique nucléaire,
Instrumentation nucléaire ou
3ème année d'école
d'ingénieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Inférence Bayésienne
Simulation numérique
Python

■ Mots clés :

Méthodes Bayésiennes,
Spectre Neutronique,
Déconvolution, sphères de
Bonner

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Rodolphe ANTONI et Achment CHALIL

rodolphe.antonini@cea.fr
achment.chalil@cea.fr





Simulations numériques de sondes gamma pour la prospection minière et établissement par Machine Learning de modèles de prédiction de la teneur en uranium

DTN/SMTA/LMN

Le stage vise à comparer les performances de différents codes pour simuler la réponse de sondes gamma utilisées en prospection minière de l'uranium, tout en explorant des méthodes d'analyse avancées basées sur du machine learning.

Dans le cadre d'une collaboration avec Orano, le CEA étudie la performance de sondes gamma utilisées pour la détermination de la concentration en uranium du minerai dans des puits de forage. Plusieurs types de sondes, dont le principe repose sur la détection des rayonnements gamma émis par l'uranium et ses descendants, peuvent être mises en œuvre, ainsi que différentes méthodes d'analyses. Associé à cet aspect expérimental, des codes de calcul sont utilisés pour modéliser et prendre en compte des effets physiques – tels que le déséquilibre radioactif de la chaîne de décroissance ou l'atténuation des rayonnements dans le minerai – pour obtenir une teneur en uranium la plus précise et la plus juste.

L'objectif du stage est de réaliser des études comparatives calculs/calculs et calculs/expérience pour évaluer les performances (justesse, précision, temps de calcul) de différents codes Monte Carlo (TRIPOLI4, MCNP, PHITS) pour la simulation de la réponse de sondes de spectrométrie gamma utilisées en prospection minière de l'uranium.

Cette étude permettra d'identifier les limites et les pistes d'améliorations possibles des voies de modélisation proposées.

Une autre étude se focalisera sur la réponse de détecteurs de type Geiger-Müller, qui repose sur des mécanismes d'interaction différents des sondes à cristaux solides comme les détecteurs germanium, NaI ou CeBr.

Enfin, un troisième volet portera sur des méthodes d'analyse avancées (Machine Learning, méta-modèles) afin de simuler la réponse de sondes gamma spectrales dans différents environnements de forage en vue d'établir des modèles de prédiction de la teneur en uranium par apprentissage automatique. La validité de ces simulations sera ensuite testée sur des diagraphies de puits réels.

■ Formation souhaitée :

Étudiant(e) en Master 2
Physique, Physique nucléaire,
Instrumentation nucléaire ou
3^{ème} année d'école
d'ingénieur

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Codes de transport Monte Carlo
Programmation : C, C++,
Python...

■ Mots clés :

Spectrométrie gamma,
analyse de données, machine
learning

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

GRUEL Adrien et PEROT Bertrand

adrien.gruel@cea.fr
bertrand.perot@cea.fr





Utilisation d'agents IA pour automatiser des calculs Monte Carlo

DTN/SMTA/LMN

Le Laboratoire de Mesure Nucléaire (LMN) de l'Institut IRESNE du CEA de Cadarache souhaite explorer l'utilisation d'agents IA pour en saisir le potentiel dans le domaine de la simulation numérique du transport de particules.

Les codes de simulation utilisent la méthode Monte Carlo qui reproduit numériquement les aléas subis par les particules lorsqu'elles interagissent avec la matière les environnant.

Typiquement, étant donnée une source de particules (source radioactive, générateur de neutron, accélérateur de particules, ...) et son environnement (murs, sol, blindages, ...) on cherche par exemple à déterminer la réponse d'un détecteur à ces particules. Optimiser les dimensions, la position ou la nature d'un détecteur requiert de nombreuses itérations de calculs [1] qui sont chronophages, car il faut modifier les paramètres un à un et relancer à chaque fois les simulations. L'utilisation d'un agent IA permettrait d'automatiser ces étapes. De la même façon, on peut aussi vouloir optimiser des épaisseurs et natures de matériaux pour minimiser le bruit de fond associé à des sources radioactives parasites [2], ou construire des méta-modèles à partir d'un grand nombre de simulations comportant plusieurs paramètres à faire varier, pour faire du Machine Learning [3]. Ces tâches seront soumises à l'agent IA en utilisant le langage naturel.

Le stage consistera à prendre en main un code en open source [4] et à l'adapter aux besoins du laboratoire

afin de tester ses performances, notamment pour l'automatisation des tâches.

Dans un premier temps, le travail du stagiaire consistera à reproduire les exemples décrits dans la publication de référence [4], en testant éventuellement l'impact de différents LLM.

Ensuite, le package devra être adapté pour pouvoir être utilisé avec un code de calcul Monte Carlo différent de celui présenté dans la publication de référence.

Enfin, les performances de l'agent seront évaluées sur des cas tests représentatifs de certaines tâches effectuées au LMN.

L'agent fonctionnera en local avec un supercalculateur d'IA de bureau, donc sans aucune connexion à internet, en utilisant une LLM disponible en open source qui aura été préalablement téléchargée et installée dans le supercalculateur.

[1] <https://theses.hal.science/tel-02366534v1> (§ II.6.2.1)

[2] <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4816-3>

[3] <https://doi.org/10.1109/TNS.2024.3351275>

[4] <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100555>

■ Formation souhaitée :

M2 issu d'un Master d'informatique mettant l'accent sur l'Intelligence Artificielle.

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

LangChain

■ Mots clés :

Agent IA, Calcul Monte Carlo, Machine Learning, LLM, Mesure nucléaire, NVIDIA

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

CARASCO Cédric
CHALIL Achment

cedric.carasco@cea.fr
achment.CHALIL@cea.fr





Méthode primale-duale proximale pour l'estimation conjointe de l'objet et de paramètres inconnus en tomographie

DTN / SMTA / LMN

Dans le cadre de l'utilisation durable et sûre de l'énergie nucléaire au service de la transition énergétique décarbonée, le réacteur de recherche Jules Horowitz, en cours de construction sur le site du CEA Cadarache, est un outil-clé pour l'étude du comportement des matériaux sous irradiation. Une ligne d'imagerie tomographique est prévue en accompagnement des dispositifs expérimentaux afin d'obtenir l'image de la dégradation des échantillons en temps réel. Cette ligne d'imagerie présente des caractéristiques extraordinaires de par sa géométrie. En conséquence, certains paramètres d'acquisition indispensables pour la bonne reconstruction de l'image, ne sont pas connus avec précision.

L'objectif de ce stage consiste en la proposition et le développement d'un algorithme permettant à la fois la reconstruction de l'image mais également l'estimation des paramètres d'acquisition inconnus. Mathématiquement, le problème est formulé sous la forme d'un problème de minimisation des moindres carrés non-linéaires séparables régularisé, comme suit:

$$\min_{\mathbf{x}, \theta} \|\mathbf{A}(\theta)\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2 + R_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) + R_{\theta}(\theta).$$

Dans la formule précédente, $\mathbf{x}$ désigne l'objet à reconstruire à partir des données $\mathbf{b}$. L'opérateur $\mathbf{A}(\theta)$ modélise l'acquisition des données et dépend des paramètres d'acquisition inconnus θ . La particularité de cette formulation réside dans la présence de deux termes de régularisation, un sur l'objet $R_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ et l'autre sur les paramètres d'acquisition inconnus $R_{\theta}(\theta)$.

La méthode de résolution explorée durant ce stage est une extension de la méthode variable-projection (initialement développée par Golub et Pereyra [1]) basée sur les méthodes primales-duales proximales [2]. En particulier, cette méthode devra être capable de gérer les deux régularisations tout en offrant des garanties de convergence théoriques.

D'un point de vue pratique, la méthode développée devra être capable de reconstruire des objets de grande taille, de l'ordre de quelques giga-octets. Les paramètres à estimer pourront eux aussi être nombreux, de l'ordre de plusieurs centaines. La méthode développée sera intégrée dans la boîte à outils Tigre [3], qui offre un cadre performant pour le développement de méthodes de reconstruction tomographiques, avec des fonctions de base optimisées pour GPU.

Enfin, l'efficacité de l'algorithme développé sera validée sur des données expérimentales. En particulier, différentes fonctions de régularisation seront investiguées afin d'obtenir la meilleure reconstruction d'image possible.

Ce stage sera mené en collaboration avec l'Institut de Mathématiques de Marseille (I2M CNRS 7373, Aix Marseille Université, site Saint Charles). Le stagiaire sera amené, pour ses travaux, à se rendre à l'I2M et au CEA Cadarache. Il ou elle évoluera ainsi au sein de deux environnements stimulants où il/elle pourra développer ses travaux en lien avec des problématiques stratégiques liées au contrôle non destructif.

[1] G. H. Golub and V. Pereyra, Separable nonlinear least squares: the variable projection method and its applications, *Inverse Probl.*, 19 (2003), pp. R1–R26, <https://doi.org/10.1088/0266-5611/19/2/201>

[2] A. Repetti, E. Chouzenoux and J. C. Pesquet, Un petit tutoriel sur les méthodes primales-duales proximales pour l'optimisation convexe. Colloque GRETSI (2015). <https://hal.science/hal-01379997v1/file/PrimalDual.pdf>

[3] A. Biguri, M. Dosanjh, S. Hancock and M. Soleimani, TIGRE: a MATLAB-GPU toolbox for CBCT image reconstruction. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 2(5):055010, Sept. 2016.

Modalités de candidature: Envoyer CV, lettre de motivation et relevé de notes M1 par mail.

Date limite de candidature : 30 Novembre 2026 (Cette date est susceptible d'évoluer en l'absence de candidatures correspondant au profil recherché.)

■ Formation souhaitée :

Master 2 ou Diplôme d'ingénieur en mathématiques appliquées et/ou en traitement du signal orienté vers le machine learning

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Programmation Python

■ Mots clés :

Reconstruction d'images;
Tomographie;
Optimisation;
Méthode primale-duale proximale

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

cecilia.tarpau@cea.fr
arthur.marmin@univ-amu.fr
frederic.richard@univ-amu.fr





Etude des formulations de dépôt d'aérosols et de gaz à prendre en compte pour la modélisation de la dispersion atmosphérique

DTN/SMTA/LMTE

Ce stage vise à consolider et améliorer les formulations du dépôt des aérosols et des gaz dans les outils de modélisation de la dispersion atmosphérique, utilisés pour l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux.

Le CEA site de Cadarache (13) est dédié à la recherche sur les énergies nucléaires et bas carbone, sur lequel se situe plusieurs installations réglementées au titre des INB ou des ICPE, potentiellement émettrices d'effluents gazeux. La modélisation du transfert des substances contenues dans ces effluents et l'évaluation des risques sur les populations et l'environnement sont réalisés par le Laboratoire de modélisation des transferts dans l'environnement (LMTE). Le LMTE a pour missions :

- de mettre en place des outils permettant de décrire et de prédire la migration des polluants dans l'environnement des installations (nucléaires, chimiques, etc.) et d'estimer l'impact associé ;
- de réaliser des études d'impact et de sûreté pour des installations (nucléaires ou non).

Dans le cadre de ses missions de R&D, le LMTE mène des travaux sur les transferts des substances radioactives ou chimiques dans l'atmosphère et dans les différents compartiments de l'environnement.

Le stage s'effectue au sein du LMTE et a pour objectif de :

- Réaliser une étude bibliographique sur les formulations de dépôts d'aérosols ou de gaz, par temps sec ou par temps pluvieux lors de leur transport dans l'atmosphère ; une attention particulière doit être apportée au spectre granulométrique et au lessivage des aérosols et des gaz en condition de pluie.
- Analyser les formulations et choisir les plus pertinentes vis-à-vis du besoin des évaluations de risque.

- Faire une inter-comparaison des formulations et les tester au sein des outils utilisés pour modéliser les transferts de polluants dans l'environnement. Seront étudiées les situations chroniques (rejet d'effluents atmosphériques en routine) et les situations accidentelles.

Le stagiaire participera en particulier :

- à l'étude de sensibilité des paramètres retenus pour la prise en compte du dépôt dans les évaluations de risque ;
- à l'amélioration de la modélisation de l'impact dosimétrique en situation de tornade.

Le stage comportera une composante en calcul scientifique, modélisation, et développement de logiciel scientifique.

Compétences recherchées :

- bonnes bases en physique dont mécanique des fluides, dispersion atmosphérique ; une expérience dans l'utilisation de logiciel de dispersion (Gaussien, CFD) serait un plus.
- bonnes bases en physico-chimie de l'atmosphère ;
- des compétences en simulation numérique et en programmation seraient appréciées.

Ce stage permettra de contribuer à l'amélioration la robustesse des outils de modélisation utilisés au laboratoire.

■ Formation souhaitée :

Étudiant(e) en Master 2/ 3^{ème} année Ecole d'ingénieur

Physique, mécanique des fluides, physico-chimie de l'atmosphère

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Simulation numérique
ADMS
Python

■ Mots clés :

Dépôt sec, dépôt humide, aérosols, gaz, dispersion atmosphérique

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Emilie Cohenny
emilie.cohenny@cea.fr





Descente d'échelle statistique 3D des vents de vallée à échelle hectométrique

DTN/SMTA/LMTE

Ce stage vise à contribuer à l'amélioration des outils de gestion de crise du CEA Cadarache en s'appuyant sur des approches d'apprentissage profond (CNN) pour offrir des prévisions des vents de vallée à haute résolution, indispensables au calcul rapide de la dispersion atmosphérique de polluants.

La prévision numérique de la dynamique atmosphérique en relief complexe (vallée alpine) requiert des maillages très fins, idéalement hectométriques, pour appréhender la dynamique locale.

Dans le cadre des activités du CEA Cadarache, l'accès rapide et précis à ces champs météorologiques à très haute résolution est pourtant critique. La prévision du transport d'un polluant lors d'un éventuel rejet accidentel dans l'atmosphère nécessite en effet de modéliser le champ de vent au sein de la vallée à courte échéance et dans un délai très contraint.

Pour répondre à ce défi, des travaux de thèse menés récemment au LMTE (Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement) se sont intéressés à la prévision des champs 2D du vent à 10 m. Ces recherches ont démontré qu'à partir d'une base d'apprentissage frugale de seulement 100 journées simulées à une résolution de 1/9 km, l'utilisation de réseaux de neurones convolutifs (CNN) permettait d'obtenir d'excellents résultats de descente d'échelle entre 1 km et 1/9 km.

Ce stage pré-thèse a ainsi pour objectif d'initier les travaux de thèse visant à étendre le modèle de descente d'échelle développé au LMTE pour le vent à 10 m vers une

reconstruction tridimensionnelle du champ d'écoulement sur le site de Cadarache. Il s'agira plus précisément de généraliser la reconstruction du vecteur vent près du sol à la restitution de sa structure verticale et spatiale dans l'ensemble du volume atmosphérique d'intérêt.

Le stage s'articulera autour de trois étapes principales :

1. Sélection de journées d'observation intense (2013, 2017) avec radiosondages fréquents ;
2. Simulation de ces journées avec le modèle de prévision WRF à haute résolution (1/9 km) et validation des simulations par rapport aux observations ;
3. Prise en main et amélioration du CNN 3D existant.

Compétences recherchées :

- Bonnes bases en physique de l'atmosphère ;
- Connaissances en méthodes d'IA, idéalement en apprentissage profond ;
- Bases très solides en programmation Python et environnement Linux ;
- Compétences en simulation numérique, idéalement avec le modèle WRF.

■ Formation souhaitée :

Master 2 / Dernière année d'école d'ingénieur (Physique de l'atmosphère, Mathématiques appliquées ou Science des données)

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python avancé, Statistiques / Deep Learning, Dynamique de l'atmosphère.

■ Mots clés :

Descente d'échelle, CNN, Vent de vallée, Analyse d'incertitude.

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Thierry Hedde
Thierry.hedde@cea.fr

Youness El-Ouartassy :
Youness.el-ouartassy@cea.fr



Modélisation d'ensemble de la dispersion de radionucléides en cas de rejet accidentel dans l'atmosphère

DTN/SMTA/LMTE

Ce stage vise à développer une approche probabiliste de modélisation de la dispersion atmosphérique afin de tenir compte des incertitudes météorologiques dans les simulations de dispersion en cas de rejet accidentel.

Les modèles de dispersion atmosphérique sont essentiels pour anticiper les conséquences sanitaires et environnementales de rejets accidentels de polluants radioactifs et orienter les mesures de protection des populations. Leurs prévisions restent toutefois soumises à des incertitudes importantes, notamment celles liées aux conditions météorologiques utilisées en entrée. L'approche ensembliste consiste à générer plusieurs simulations météorologiques (appelées « membres ») plutôt qu'une prévision déterministe unique, ce qui permet de mieux caractériser ces incertitudes.

Dans le cadre de ses missions de R&D, le Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement (LMTE) mène des travaux sur les transferts de substances radioactives ou chimiques dans l'atmosphère. Un système de prévision d'ensemble de 30 membres a ainsi été développé au sein du LMTE en couplant l'ensemble de prévisions GEFS au modèle atmosphérique WRF. Un tel ensemble permet de représenter l'incertitude météorologique et d'en évaluer l'impact sur la dispersion de polluants dans l'atmosphère. Cependant, simuler la dispersion pour l'ensemble des 30 membres peut être coûteux en temps de calcul, notamment dans le contexte de la gestion de crise nucléaire.

L'objectif du stage est donc de développer une méthode permettant de sélectionner un nombre réduit de membres météorologiques tout en conservant au mieux les propriétés statistiques de l'ensemble complet.

Le stage s'articulera autour de quatre étapes principales :

1. Évaluer les performances de l'ensemble météorologique complet sur le site de Cadarache, par comparaison avec les mesures disponibles.
2. Mettre en œuvre et tester des méthodes d'apprentissage non supervisé (e.g, k-means et clustering hiérarchique) afin de sélectionner un nombre restreint de membres représentatifs.
3. Évaluer la représentativité des sous-ensembles météorologiques ainsi sélectionnés par rapport à l'ensemble complet.
4. Modéliser la dispersion à l'aide d'un code gaussien et quantifier l'impact du clustering sur les résultats de dispersion.

Compétences recherchées :

- Bonnes bases en physique de l'atmosphère,
- bases solides en programmation python,
- des compétences en simulation numérique,
- une première expérience en modélisation atmosphérique serait un plus.

■ Formation souhaitée :

Master 2 / Dernière année d'école d'ingénieur (Physique de l'atmosphère, Mathématiques appliquées ou Science des données)

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python avancé,
Statistiques / Machine Learning,
Dynamique de l'atmosphère.

■ Mots clés :

Prévision d'ensemble, Analyse d'incertitude, Clustering, Dispersion atmosphérique, Gestion de crise

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

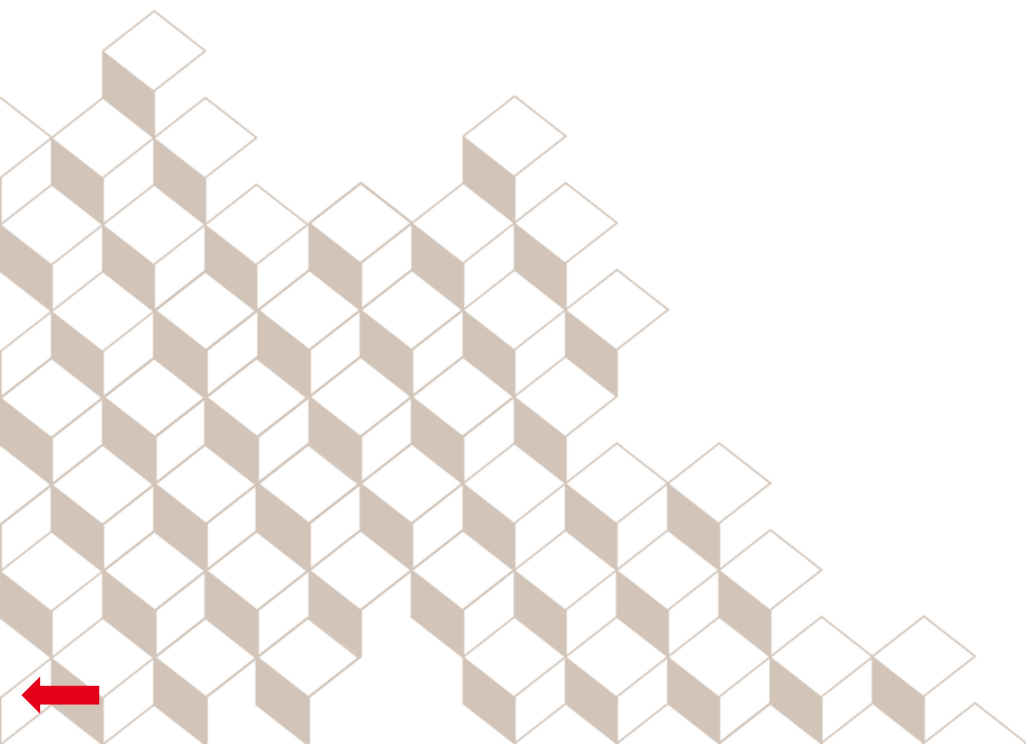
Youness El-Ouartassy
Youness.el-ouartassy@cea.fr

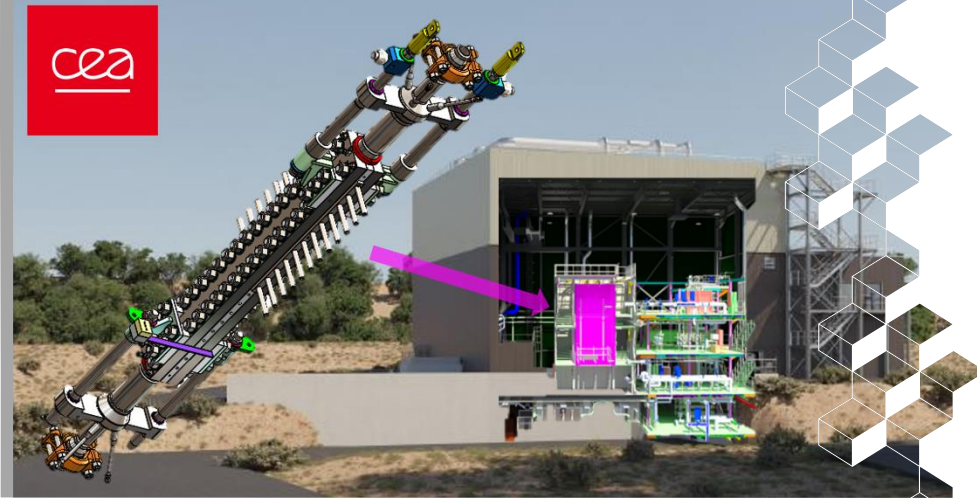


STCP

Service de
technologie des
composants et des
procédés

*Component Technology and Processes
unit*





Conception mécanique de sections d'essais

DTN / STCP / LCIT

Stage au CEA Cadarache : participez à la conception de sections d'essais pour étudier la crise d'ébullition dans les réacteurs nucléaires

Le DTN/STCP, département du CEA de Cadarache (Saint-Paul-lez-Durance), a pour mission d'améliorer les technologies des réacteurs nucléaires actuels et de développer des solutions innovantes pour les réacteurs du futur. Ses activités couvrent la conception et l'innovation technologique, le développement et la qualification expérimentale de composants, d'instrumentation et de procédés.

Parmi ses entités, le LCIT (Laboratoire de Conception et d'Innovations Technologiques) est spécifiquement chargé de la conception mécanique, du dimensionnement, et du suivi de réalisation des composants.

Le projet dans lequel s'inscrit ce stage vise à mener des essais sur la crise d'ébullition (un phénomène thermo-hydraulique) sur des sections d'essais. Ces sections seront testées sur une future boucle d'essais, reproduisant les conditions nominales des réacteurs (hautes pression et température). Cette boucle pourra accueillir des sections représentatives d'éléments combustibles de réacteurs. Le design mécanique de ces sections est piloté par le LCIT.

Pour finaliser le design des sections d'essais, plusieurs études de conception mécanique sont nécessaires, notamment la conception d'outillages pour la fabrication ou l'exploitation des sections d'essais, la réalisation de modèles CAO et de plans techniques, la rédaction de cahiers des charges pour la fabrication de composants.

■ Formation souhaitée :

BUT GMP

■ Durée du stage :

3 mois

■ Méthode/logiciel(s):

SolidWorks

CATIA

Office

■ Mots clés :

Conception

Mécanique

CAO

■ Possibilité de thèse :

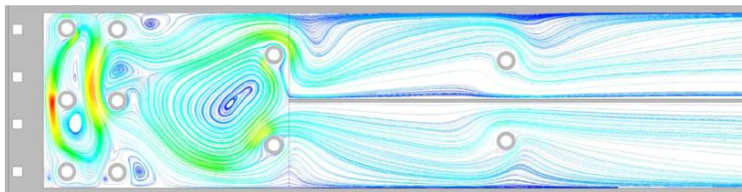
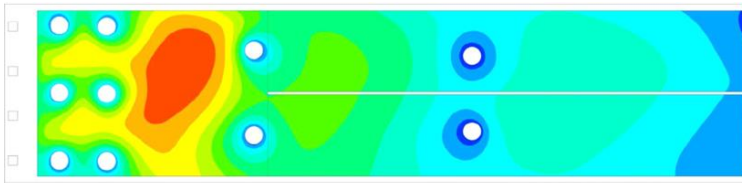
Non

■ Contact :

LASCAUX Jean

Jean.lascaux@cea.fr





Modélisation numérique de la magnéto-convection dans les couvertures tritigènes pour les réacteurs de fusion

DTN / STCP / LCIT

Face à la montée croissante des enjeux liés aux réacteurs de fusion, le LCIT propose un stage visant à utiliser un solveur développé en interne pour modéliser la magnéto-convection dans les couvertures tritigènes.

Ce solveur multiphysique devra résoudre les équations de Navier-Stokes, de Maxwell et de la chaleur, afin d'étudier les interactions complexes entre champs magnétiques, écoulements fluides et transferts thermiques.

Le LCIT, Laboratoire de Conception et d'Innovations Technologiques, est impliqué en tant qu'expert dans les projets de réalisation d'installations de R&D en support aux projets du CEA et également en réponse aux innovations technologiques d'industriels internationaux. Ces projets peuvent appartenir aux secteurs du nucléaire (fission, fusion), des énergies renouvelables, de la défense ou du nucléaire spatial.

Les échanges thermiques (échangeurs innovants, stockage thermique de grande capacité, ...) et le pompage (pompe électromagnétique, thermopompe, ...) font partie des sujets centraux, pour lesquels des études de conceptions mécaniques et des calculs multiphysiques (thermique, hydraulique, mécanique, électromagnétique, ...) sont réalisés.

Avec l'essor des projets de fusion nucléaire et le développement de concepts avancés de réacteurs à confinement magnétique, les couvertures tritigènes s'imposent comme un composant clé des futurs réacteurs. Ces systèmes, qui doivent notamment assurer la production du tritium et l'évacuation de la chaleur, sont soumis à des écoulements de métaux liquides sous de forts champs magnétiques. Leur conception nécessite ainsi une modélisation fine des interactions

complexes entre magnétohydrodynamique (MHD), transferts thermiques et dynamique des fluides.

Le LCIT dispose déjà d'un solveur numérique dédié pour étudier ces phénomènes. L'objectif du stage est d'utiliser et d'améliorer cet outil pour modéliser la magnéto-convection dans les couvertures tritigènes.

Le stage se déroulera suivant les principaux axes suivants :

- Travail de bibliographie
- Apprentissage théorique (fusion nucléaire, MHD)
- Prise en main des outils numériques
- Définition d'une étude de référence à mener
- Simulation numérique avec couplage des équations de Navier-Stokes, de l'équation de la chaleur et d'induction

■ Formation souhaitée :

École d'ingénieur, Bac +5

Spécialité simulation numérique, Mécanique des fluides, Thermique, Electromagnétique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Simulation numérique, CFD, Volumes Finis, OpenFOAM

■ Mots clés :

MagnétoHydroDynamique (MHD), Mécanique des fluides, Transferts thermiques, Fusion

■ Possibilité de thèse :

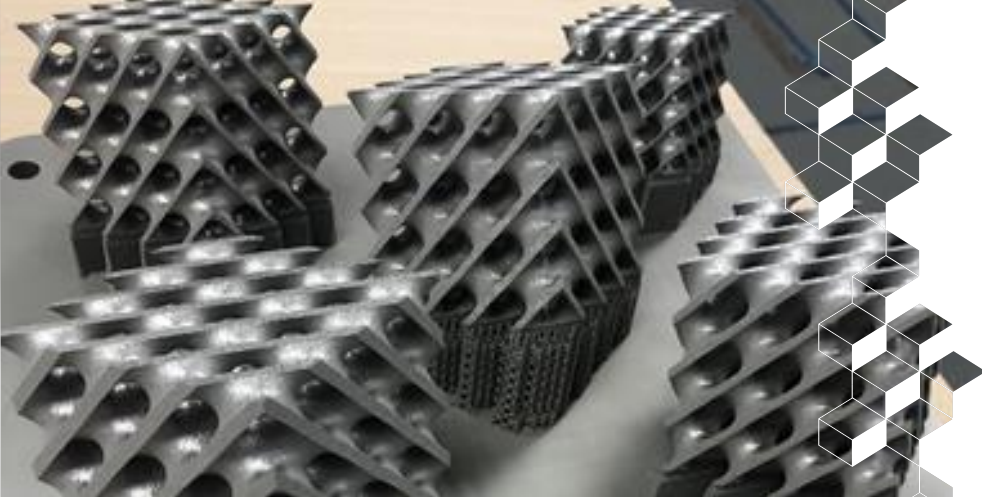
Oui

■ Contact :

CHELIHI Brahim

brahim.chelihi@cea.fr





Simulation numérique instationnaire de canaux d'échanges TPMS

DTN/STCP/LCIT

Le laboratoire de Conception et d'Innovation Technologique (LCIT) conçoit un échangeur de chaleur compact en s'appuyant sur des géométries de canaux complexes, rendues accessibles par les procédés de fabrication additive. L'objectif de ce stage sera de réaliser une étude CFD permettant une analyse poussée des ces écoulements, en vue d'une comparaison avec des données expérimentales.

Dans le cadre du projet RDMSR dédié aux développements des réacteurs à sel fondu, le Laboratoire de Conception et d'Innovation Technologique (LCIT) explore les structures TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) appliquées aux échangeurs de chaleur. Ces structures accessibles par les procédés de fabrication additive constituent une piste d'intérêt pour améliorer le compromis entre compacité de l'échangeur et risque d'encrassement.

Ce stage s'intègre dans le cadre d'une thèse en cours au LCIT, visant à caractériser les structures TPMS au moyen d'essais expérimentaux et modélisations numériques. Plusieurs campagnes de calculs CFD RANS ont déjà permis de caractériser les échanges thermiques convectifs et les pertes de charges de tels motifs. De premiers résultats expérimentaux sont attendus d'ici fin 2026.

L'objectif de ce stage sera d'interroger ces résultats au travers de calculs instationnaires, basés sur des modélisations résolvant les grandes échelles, de type LES (*Large Eddy Simulation*). Une telle étude a été initiée durant la thèse, mais est encore incomplète. Ces résultats seront également à analyser en comparaison avec des données expérimentales recueillies en amont du stage (température,

pression, et visualisations de l'écoulement par PIV).

Ces calculs CFD seront réalisés au moyen du logiciel ANSYS FLUENT. Le pré-traitement et post-traitement sera assisté à l'aide de codes Python et du logiciel libre SALOME.

En fonction de l'avancement des travaux, d'autres thématiques pourront être couvertes : variations géométriques, estimation numérique des effets de rugosité en paroi, soutien sur les campagnes expérimentales...

■ Formation souhaitée :

BAC +5 (Diplôme d'ingénieur ou Master 2), avec spécialisation en mécanique des fluides et connaissance des méthodes numériques appliquées à la CFD

■ Durée du stage :

5-6 mois, à partir de février 2027

■ Méthode/logiciel(s):

ANSYS FLUENT, PYTHON, SALOME

■ Mots clés :

CFD, Simulation numérique, LES, Turbulence, Thermohydraulique

■ Possibilité de thèse :

non

■ Contact :

RENON Clément
clement.renon@cea.fr



Etude de dimensionnement thermomécanique RCC-MRx d'un dispositif d'irradiation expérimental

DTN/STCP/LCIT

Le CEA IRESNE a pour mission d'étudier des technologies innovantes, en soutien au parc électrogène français et aux réacteurs futurs. Ce stage de fin d'études s'inscrit dans le cadre du développement du réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH), avec l'étude thermomécanique d'un de ses dispositifs (LEBICA) sous irradiation.

Les manchettes thermiques sont des Dans le cadre des futurs essais d'irradiation du réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH), des dispositifs expérimentaux sont en cours de développement.

L'objectif du stage est d'effectuer une première étude thermomécanique du dispositif expérimental LEBICA par le CEA. L'étude portera sur le fonctionnement nominal en régime permanent. Le dispositif est constitué de plusieurs enveloppes soumises à un flux d'irradiation. L'enveloppe extérieure est refroidie par le débit d'eau du circuit primaire. Le fluide interne plomb-bismuth est à très haute température, et il est supposé statique. L'objectif est de dimensionner mécaniquement les différentes parties du dispositif en respectant les critères de dimensionnement applicables pour les réacteurs expérimentaux (code RCC-MRx).

Le stagiaire se basera sur les données d'entrée disponibles, fournies par le RJH et les études antérieures (CAO ou plans, flux, fluence, déplacement par atome, échauffements gamma, températures fluides et coefficients d'échanges convectifs du fluide primaire, etc..).

En complément, il faudra réaliser une recherche des caractéristiques physiques du plomb-bismuth pour la définition des coefficients d'échange dans les calculs thermiques, et des caractéristiques matériaux nécessaires pour les calculs et les analyses, si matériau hors RCC-MRx.

Cette étude s'appuiera sur un modèle éléments finis sous ANSYS en 2D axisymétrique pour des calculs thermiques et mécaniques du fonctionnement nominal en permanent.

Les résultats de ces calculs mécaniques seront analysés pour vérifier les critères du code de dimensionnement (dommages de type P au sens du RCC-MRx), en fluage négligeable et significatif, en irradiation négligeable et significative. Selon les résultats et l'avancement du stage, des optimisations de la géométrie seront évaluées.

Une note technique sera rédigée.

Les travaux seront menés sous la supervision des ingénieurs et experts en thermomécanique du LCIT.

Le stagiaire devra être volontaire pour s'approprier le sujets et les différents concepts. Un solide bagage technique en mécanique et thermique, ainsi qu'une bonne autonomie sont nécessaires pour mener à bien le stage. Une culture de l'énergie nucléaire serait un plus.

À l'issue du stage, le stagiaire disposera d'une forte expérience en ingénierie mécanique dans le cadre d'un projet de R&D innovant.

■ Formation souhaitée :

3^e année d'école d'ingénieur (BAC +5)

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

ANSYS Workbench, Solidworks, RCC-MRx

■ Mots clés :

RDM, éléments finis, règles de dimensionnement, conception mécanique, haute température, irradiation

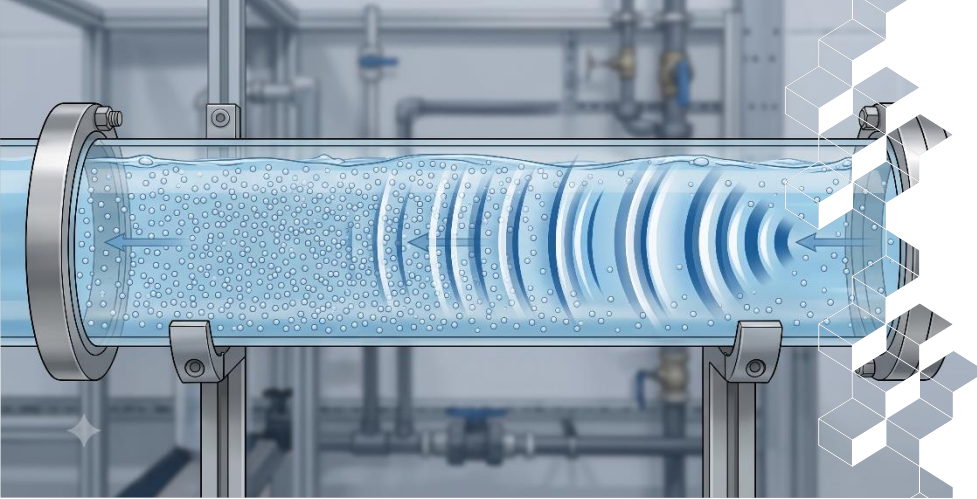
■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

FACHE Simon-Pierre
simon-pierre.fache@cea.fr





R&D Acoustique Prototypage d'une méthode innovante de détection de fuites

DTN/STCP/LISM

Un projet à forte dominante expérimentale afin de valider une technologie de rupture en acoustique. Vous devrez établir la faisabilité d'une méthode inédite de détection et de caractérisation de bulles en milieu liquide, avec une application industrielle majeure à la clé : la détection précoce de fuites.

Le contexte : détecter l'indétectable

Dans l'industrie, et tout particulièrement dans le secteur nucléaire, la détection précoce d'une fuite de gaz au sein d'un écoulement liquide est un enjeu de sécurité et de performance majeur. Si les fuites conséquentes sont aujourd'hui bien maîtrisées, les micro-fuites naissantes passent sous les radars des capteurs actuels. Notre objectif ? Être capables de détecter des taux de vide (fractions volumiques de gaz) infimes, pouvant descendre jusqu'à 10^{-6} .

Le défi scientifique : dépasser les limites technologiques de l'acoustique classique - La présence (même infime) de gaz vient perturber la propagation des ondes acoustiques dans les liquides, un phénomène décrit par le modèle de Wood. Celui-ci impose cependant une contrainte physique stricte : émettre des ondes à une fréquence inférieure à la fréquence de résonance des bulles. Le problème ? Avec les sondes piézoélectriques traditionnelles, descendre sous la barre des 10 kHz est très difficile.

C'est ici que s'inscrit ce stage : le laboratoire a imaginé une méthode de génération d'ondes basses fréquences totalement inédite permettant de contourner cette limite. Cette solution novatrice a vocation à être brevetée si tes résultats sont concluants.

La mission : du prototypage à la preuve de concept

L'objectif sera de transformer cette idée en un dispositif expérimental fonctionnel. Les missions s'articuleront autour de :

- Conception & Prototypage : Imaginer et fabriquer le dispositif de génération d'ondes basses fréquences avec recours notamment recours à la fabrication additive (impression 3D) pour réaliser des itérations rapides.
- Intégration expérimentale : Adapter et instrumenter une boucle expérimentale d'écoulement diphasique (déjà opérationnelle au laboratoire) pour y greffer les prototypes.
- Mesure & Traitement : Déployer la chaîne d'acquisition acoustique permettant de mesurer la vitesse de Wood avec une grande précision.
- Campagnes d'essais : Mener les tests, analyser les données, qualifier la méthode de mesure et prouver la viabilité industrielle du concept.

Pourquoi choisir ce stage ?

- Fort impact : travail sur une technologie de rupture répondant à un besoin industriel concret.
- Approche "Maker" & R&D : Un équilibre parfait entre l'exigence scientifique fondamentale et la manipulation concrète (conception CAO, impression 3D, banc fluide).

■ Formation souhaitée :

Master 2 Acoustique ou Ingénieur ayant suivi une spécialisation en acoustique (ENSIM, UTC, ECL, ECM, INSA...) – Master 2 ou ingénieur ayant suivi une formation en mesures physiques, en instrumentation, en matériau ou en physique générale.

■ Durée du stage :

4 à 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

CND Ultrasonore – Python
Compétences de base en CAO

■ Mots clés :

Acoustique, ultrasons, propagation acoustique, bulles, diphasique, expérimentations

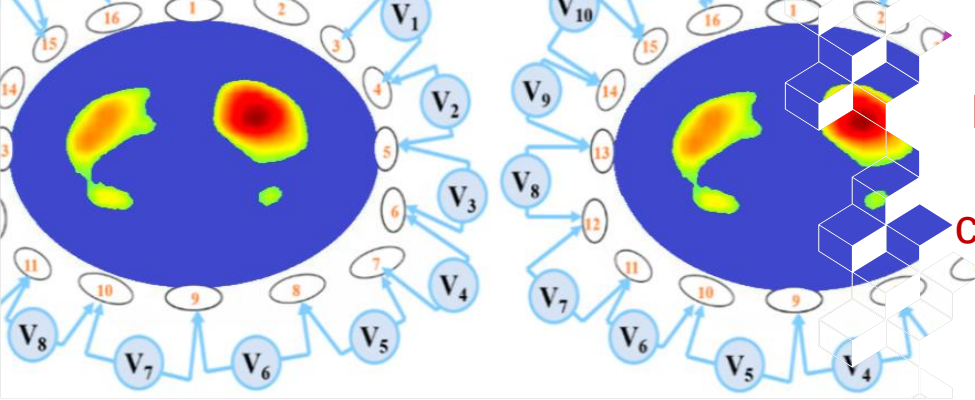
■ Possibilité de thèse :

Non, à confirmer

■ Contact :

CAVARO Matthieu
matthieu.cavaro@cea.fr





Méthode de reconstruction par IA d'un domaine conducteur en tomographie d'impédance électrique

DTN/STCP/LISM

Ce stage vise à développer une méthode de Tomographie d'Impédance Électrique (EIT) en utilisant des Physics-Informed Neural Networks (PINN). Il s'agit de résoudre simultanément le problème direct — calcul du potentiel — et le problème inverse — estimation du champ de conductivité. Le ou la stagiaire construira des modèles PINN 2D prenant en compte les mesures réalisées pour toutes les configurations d'électrodes. L'objectif final est d'évaluer les capacités et la fiabilité de la méthode en vue d'une extension aux équations de Maxwell en régime harmonique.

Contexte scientifique

Dans le cadre du développement de nouvelles méthodes d'instrumentation pour la sûreté nucléaire, le CEA/IRESNE étudie une approche innovante utilisant l'IA et plus précisément les PINN pour résoudre un problème d'EIT pour pouvoir l'appliquer aux milieux métalliques. L'objectif de l'EIT est de reconstruire la forme d'un domaine conducteur à partir des mesures des potentiels relevés sur des électrodes en périphérie injectant un courant. Cela permet de détecter une bulle incidentellement présente dans du métal.

Objectifs scientifiques

Il faut montrer la capacité des PINN pour reconstituer la géométrie réelle du domaine conducteur uniquement à partir des données expérimentales (courants injectés, tensions aux électrodes) et des contraintes liées aux équations de la physique. On supposera dans notre cas une conductivité avec une valeur binaire indiquant la présence ou non du milieu conducteur au point considéré.

La finalité est de préparer une extension vers la formulation électromagnétique complète basée sur les équations de Maxwell en régime harmonique qui permet d'appliquer l'EIT en temps réel sur un écoulement de métal.

Déroulement

Il faudra mettre en place en premier le modèle direct. Dans ce cas, la conductivité est connue et le PINN détermine le potentiel en vérifiant que les équations de la diffusion électrique sont vérifiées. La physique et les conditions aux limites sont intégrées dans la fonction de perte du réseau de neurones. Le Modèle doit pouvoir prendre en compte une puis plusieurs paires d'électrodes.

Il faut ensuite construire le modèle inverse : La conductivité est inconnue et doit être reconstruite. Deux réseaux neuronaux sont entraînés simultanément pour donner le potentiel et la conductivité. La fonction de perte inclue alors aussi des contraintes de binarité et une régularisation pour stabiliser les frontières du milieu conducteur.

Enfin, le ou la stagiaire étudiera l'influence des hyperparamètres, la fiabilité de la méthode en fonction du bruit expérimental, et la taille minimale des zones isolantes détectables.

■ Formation souhaitée :

En master 2 scientifique ou dernière année d'école d'ingénieur.
Notions en électromagnétisme.
Connaissance du Python.

■ Durée du stage :

5 ou 6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Python, PyTorch, COMSOL

■ Mots clés :

Tomographie, EIT, IA, Physics-Informed Neural Networks

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Frédéric MICHEL

Michel.frederic@cea.fr





Conception d'un dispositif expérimental pour l'étude thermo-hydraulique du phénomène de flashing intervenant dans les générateurs de vapeur au passage des plaques entretoises

DTN/STCP/LTHC

Un dispositif expérimental dédié à l'étude du flashing dans les générateurs de vapeur, phénomène à l'origine de leur colmatage, est en cours de développement au CEA IRESNE. L'objectif de ce stage est de concevoir et de mettre en œuvre la boucle thermohydraulique, ainsi que la section d'essais. La section d'essais devra être compatible avec une instrumentation spécifique, de mesure d'impédance pour suivre la quantité de vapeur produite.

Le flashing est un phénomène hydrodynamique qui survient lorsque la pression locale d'un liquide chute en dessous de sa pression de saturation. Il conduit à la formation de bulles de vapeur au sein même du liquide. Cette baisse de pression se produit typiquement lorsque le fluide circule à grande vitesse, en particulier dans des zones de forte accélération, comme au passage de restrictions géométriques. Au-delà de son intérêt fondamental en mécanique des fluides, le flashing est un enjeu industriel majeur. Des travaux récents suggèrent en particulier qu'il pourrait jouer un rôle déterminant dans l'amorçage et la croissance de dépôts d'oxyde de fer, responsables du colmatage progressif des plaques entretoises des générateurs de vapeur (GV) des réacteurs à eau sous pression (REP). En effet, à mesure que la teneur en vapeur augmente, la concentration en ions Fer dans la phase liquide augmente aussi, entraînant ainsi la précipitation d'oxydes de fer dès que la limite de solubilité est dépassée. Les enjeux sont économiques, puisque que les dépôts diminuent la qualité de l'échange de chaleur mais ils concernent également la sûreté.

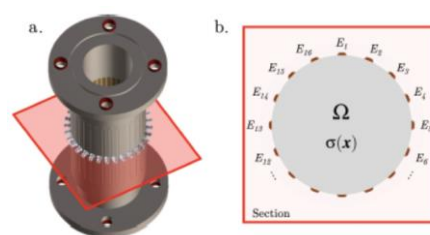
L'objectif de ce stage est de concevoir et de mettre en œuvre un dispositif d'essais pour l'étude du flashing par mesure par impédance sur une boucle existante (DIOGEN). Le travail portera dans un premier temps sur la définition des spécifications hydrauliques et instrumentales du banc, incluant le choix des composants, leur mise en place sur la boucle existante et l'intégration d'un capteur de mesure par impédance. Une fois le banc opérationnel, une première campagne d'essais exploratoires

sera conduite avec pour objectif de reproduire et de contrôler l'apparition du flashing.

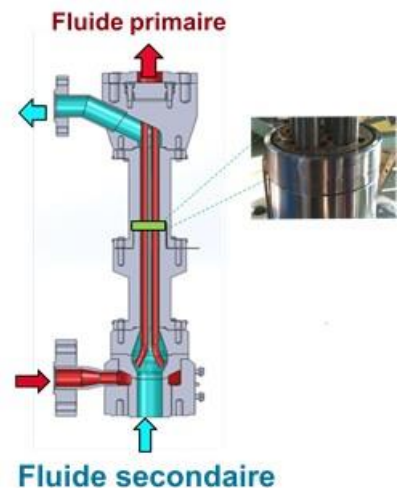
La conception de la section d'essais devra être modulaire afin de permettre d'utiliser de l'instrumentation innovante développée au CEA telle que les fibres optiques, les mesures optiques par laser...

Ce stage sera ainsi l'occasion pour l'étudiant(e) d'acquérir une expérience concrète en conception et mise en œuvre de dispositifs expérimentaux en mécanique des fluides, d'aborder des techniques avancées d'instrumentation, et de développer une première compréhension de l'influence des paramètres thermo-hydrauliques sur un phénomène multiphysique complexe.

Le stage, d'une durée de six mois, se déroulera au CEA IRESNE au sein du Laboratoire de Thermohydraulique du Cœur et des Circuits (LTHC). Il s'adresse à un(e) étudiant(e) de dernière année d'école d'ingénieur ou de Master 2, spécialisé(e) en conception mécanique et mécanique des fluides, énergétique ou génie des procédés. L'encadrement sera assuré par l'ingénieur Sébastien FRANCOIS. À l'issue du stage, une poursuite en thèse sur cette thématique est possible.



Principe mesure par impédance



Exemple de section d'essais (GV)

■ Formation souhaitée :

Dernière année d'école d'ingénieur ou de Master 2, avec une spécialisation en conception mécanique et mécanique des fluides, énergétique ou génie des procédés

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Conception de composants pour des applications hautes températures et pressions (ESP)

■ Mots clés :

Thermohydraulique nucléaire, flashing, mesure d'impédance

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

FRANCOIS Sébastien
Sebastien.francois@cea.fr





Définition d'une manipulation expérimentale pour l'étude du renoyage par le haut à haute température

DTN/STCP/LTHC

Ce stage vise à définir une expérimentation qui servira à étudier le mécanisme de renoyage par le haut, phénomène thermohydraulique jouant un rôle important pour la sûreté des réacteurs nucléaires.

Le travail s'inscrit dans une logique de recherche et développement à long terme sur le sujet du renoyage.

En conditions accidentelles, le cœur d'un réacteur nucléaire peut être asséché partiellement ou totalement suite à une brèche ou à un arrêt intempestif des pompes. Le renoyage correspond à la remise sous eau des crayons combustibles, et joue donc un rôle important pour la sûreté. Suivant les conditions accidentelles, le renoyage peut survenir soit par le bas du cœur, soit par le haut.

Le renoyage par le haut est un phénomène physique complexe qui dépend de plusieurs mécanismes : déstabilisation de l'écoulement par instabilité hydrodynamique, blocage de l'écoulement par engorgement liquide/vapeur, refroidissement des parois chaudes par projection de gouttelettes, établissement d'un film de liquide stable sur les parois, puis renoyage progressif.

Le travail de ce stage est dédié à l'étude du renoyage par le haut, et vise à combler le manque de données sur ce phénomène à haute température en définissant une manipulation expérimentale. Le travail passera par :

- L'estimation des nombres adimensionnels d'intérêt pour que l'expérimentation soit représentative du réacteur visé. Cette analyse dimensionnelle pourra être soutenue par l'emploi d'algorithmes d'optimisation

numérique permettant de hiérarchiser les nombres adimensionnels.

- La résolution du problème de conduction thermique en deux dimensions (radiale et axiale) dans la paroi, phénomène important pour estimer la progression du front de trempé. La connaissance de la température est par ailleurs requise pour pouvoir remonter par méthode inverse au flux thermique à partir des données expérimentales.
- La réalisation de calculs en Python pour estimer les conditions thermiques (puissance, débit, température) conduisant à un engorgement en employant les corrélations expérimentales historiques modélisant le phénomène

A l'issue du stage, une petite expérimentation en eau froide et en air pourra être réalisée, qui servira de prototype pour une expérimentation chauffée de taille plus importante.

Le stage sera rattaché au Laboratoire de Thermohydraulique du Cœur et des Circuits (LTHC), et au Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (LMAG) du centre CEA de Cadarache.

■ Formation souhaitée :

M2/ingénieur avec des compétences en mécanique des fluides et en thermique

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

Linux/Windows, Python

■ Mots clés :

Thermohydraulique double-phase, thermique, mécanique des fluides, expérimental

■ Possibilité de thèse :

Oui

■ Contact :

Jimmy Martin
Xavier Manchon

jimmy.martin@cea.fr
xavier.manchon@cea.fr



2027



**Retrouvez toutes nos offres de
stage sur
[IRESNE - Stages et alternances](#)**

*Discover all our
internship offers on
[IRESNE's website - Internships and work-study positions](#)*

iresne@cea.fr
04 42 25 20 71



IRESNE - bât.707
CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lès-Durance