IRESNE 2026 SUJETS DE STAGES

IRESNE INTERNSHIP SUBJECTS

iresne@cea.fr
04 42 25 20 71

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

cea iresne

Sommaire
Summary

Présentation de l'IRESNE
About IRESNE

IRESNE : Un institut du CEA situé à Cadarache
IRESNE : a CEA Institute at Cadarache

Les stages à l'IRESNE en pratique
IRESNE internships in pactice

Sujets de stage par Département de recherche au sein de l'IRESNE :
Internship subjects by research department :

Département d'études des combustibles
Fuel Studies Departement

Département d'études des réacteurs
Reactor Studies Departement

Département de technologie nucléaire
Nuclear Technology Departement

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. Crée le 1er février 2020 par le CEA, l'IRESNE rassemble une équipe de 900 collaborateurs qui conçoivent, simulent, testent et qualifient les réacteurs nucléaires actuels et de demain.

L'IRESNE ouvre également son champ de recherches à l'intégration des systèmes nucléaires dans le mix énergétique bas carbone.

Le nucléaire, au-delà de la production d'électricité, est une source de production de chaleur.

Ce sont les innovations technologiques en soutien à ces deux composantes, électricité et chaleur, que l'institut approfondit dans ses recherches.

L'objectif de cette optimisation est d'offrir à la société un mix énergétique puisant dans toutes les ressources bas carbone.

La création de l'institut s'inscrit dans la mise en place, au sein du CEA, d'une organisation dédiée aux études sur les énergies décarbonées. Cette organisation répond à la volonté du gouvernement français de créer un mix énergétique décarboné qui s'appuie sur l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Les objectifs sont fixés par l'Etat dans le cadre de la loi de transition énergétique pour une croissance verte et les lois de Programmation Pluriannuelle de l'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. La Direction des énergies regroupe également un Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone (ISAS) et un Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (ISEC).

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 900 employees who design, simulate, test and qualify current and future nuclear reactors.

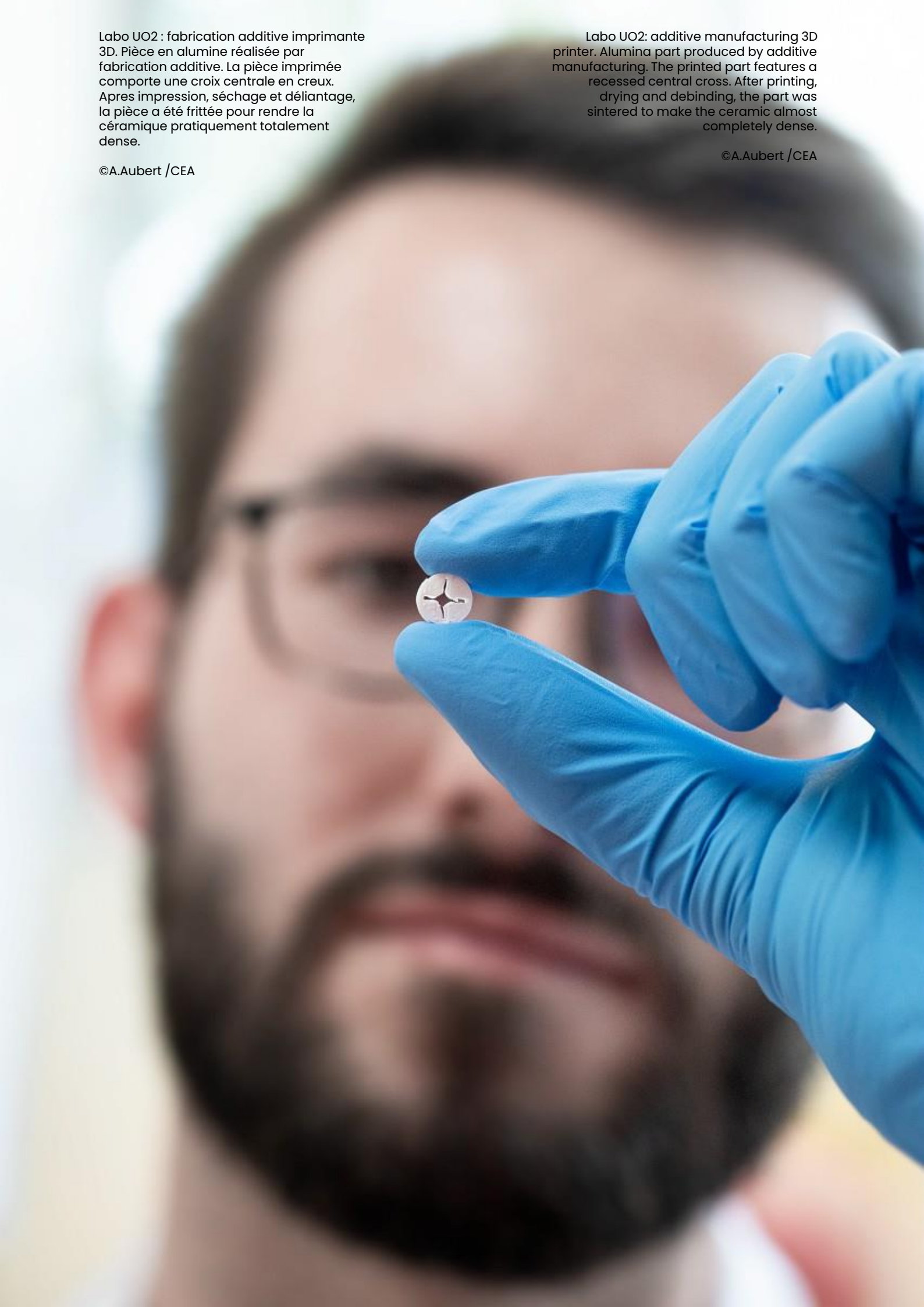
IRESNE is also opening up its field of research to the integration of nuclear systems into the low-carbon energy mix.
In addition to producing electricity, nuclear power is also a source of heat.

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.

To this end, the CEA has created an Energy Division (DES), which includes the IRESNE institute. The Department of Energies also includes an Institute of Applied Sciences and Simulation for Low-Carbon Energies (ISAS) and an Institute of Sciences and Technologies for a Circular Economy of Low-Carbon Energies (ISEC).



Labo UO2 : fabrication additive imprimante 3D. Pièce en alumine réalisée par fabrication additive. La pièce imprimée comporte une croix centrale en creux. Apres 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).

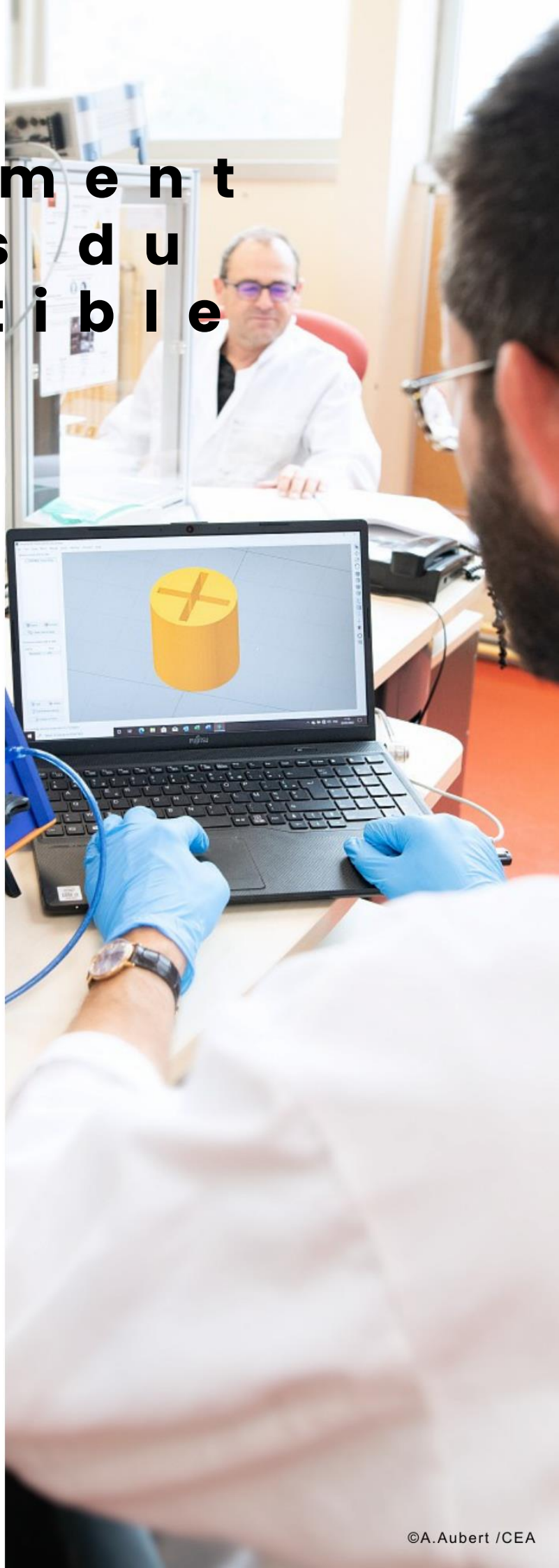
A wide choice of accommodation in the 4 surrounding departments is available to trainees: for city dwellers, the towns of Aix en Provence (30 minutes by freeway), Pertuis (20 minutes by road), Manosque (10 minutes by freeway); for country lovers, the villages of Luberon, Var, Alpes de Haute Provence,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

"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

Département d'Etudes du Combustible

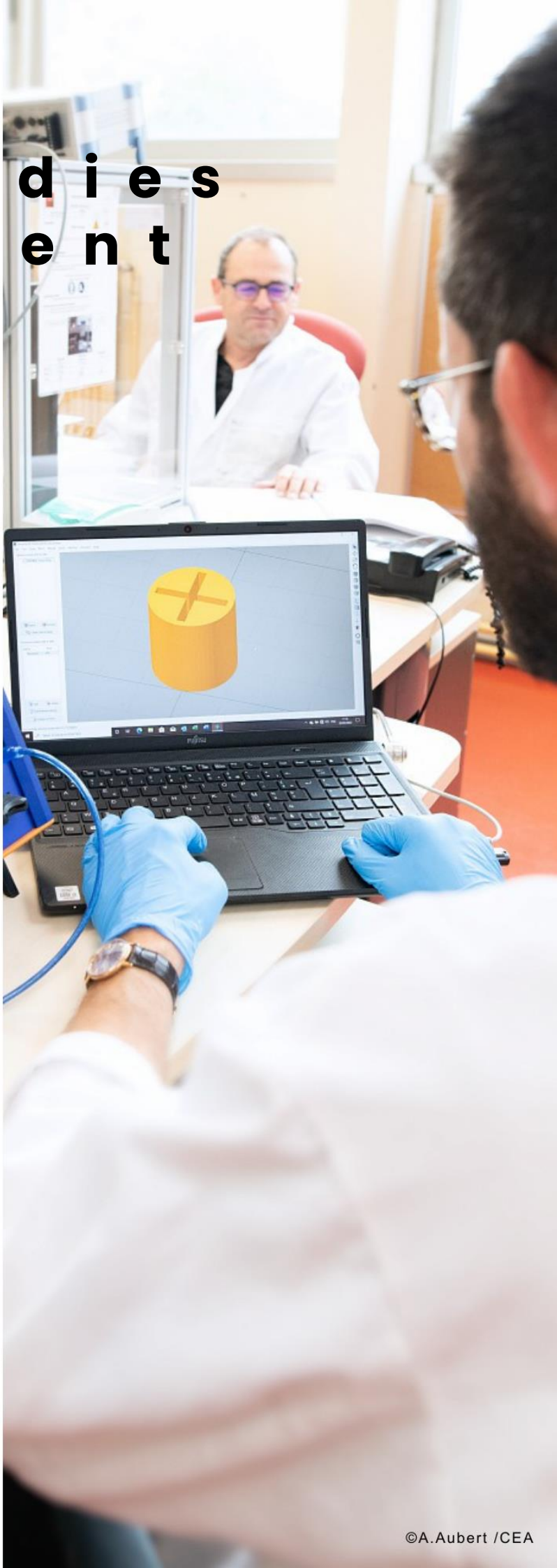


Le Département d'Etudes des Combustibles (DEC) mène une activité centrée autour du combustible nucléaire dans l'objectif d'accroître les performances et la sûreté des réacteurs actuels (générations 2&3) et de développer les combustibles nucléaires des réacteurs du futur (4ème génération).
Il a pour mission 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).

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des combustibles / *Fuel Studies Departement*

SA3E – Service d'analyses, d'élaboration, d'expérimentations et d'examens des combustibles

Dispositif pour la caractérisation à haut débit de combustible nucléaire
Suivre au plus près le relâchement des gaz de fission hors du combustible nucléaire
Comportement d'un combustible nucléaire au contact de sodium
Caractérisation des propriétés thermiques du dioxyde d'uranium par des techniques laser
Développement et qualification d'une expérience de chauffage laser pour l'étude du combustible nucléaire en situation accidentelle
Sur les traces des Xe et Cs échappés du combustible nucléaire
Evaluation quantitative du couplage thermo mécanique en Thermodynamique des Processus Irréversibles (TPI)
Interférométrie de speckle à deux longueurs d'onde avec décalage de phase par polarisation
Dissolution d'alliage aluminium pour l'analyse du chlore stable
Dosage d'acides organiques dans des matrices complexes par IC-MS
Analyse du ^{137}Cs et du ^{210}Pb dans des échantillons de sédiments lacustres
Analysis of ^{137}Cs and ^{210}Pb in Lake Sediment Samples
Analyse de l'iode 129 dans des déchets nucléaires solides
Qualification du nouveau spectromètre à scintillation liquide HIDEX 300 SLL
Comprendre le cœur du combustible : quand les défauts atomiques dictent les propriétés macroscopiques
Understanding the fuel core: when atomic defects dictate macroscopic properties
Caractérisation rhéologique des pâtes d'impression pour un procédé de fabrication additive de cermet UO_2 / Molybdène
Comparaison de protocoles pour la réalisation de mesures par granulométrie laser en voie liquide
Etude de la ségrégation des poudres d'UO_2 sous vibrations
BRO-IA-GE : Prédire l'état du broyage avec l'instrumentation et un algorithme d'apprentissage
Etude du broyage de poudres par des mesures de compression dynamique de particules
Effet du dopage par un oxyde métallique sur le frittage d'un combustible UO_2

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des combustibles / *Fuel Studies Departement*

SESC – Service d'études et de simulation du comportement des combustibles.

Modélisation et simulation à l'aide du code ExaDEM de dispositifs expérimentaux pour l'étude de milieux granulaires
Développement et mise en œuvre de méthodes itératives efficaces pour la résolution du contact dans un contexte HPC
Optimisation d'un solveur parallèle pour la modélisation du contact entre solides déformables
Prototypage de la simulation du pressage par une méthode sans maillage
Écoulement granulaire dans un tambour tournant : Comparaison Simulations vs expériences
Mise en place d'une simulation thermomécanique d'un assemblage combustible de réacteur nucléaire de recherche sur supercalculateurs HPC
Modélisation HPC d'un assemblage combustible type RJH et benchmark
Parallélisation hybride MPI + GPU du code de champ de phase SLOTH
Modélisation thermomécanique du frittage : lien pressage-frittage
Etude numérique par méthode DEM de l'effet de taille des particules sur les écoulements granulaires dans un tambour tournant
Génération automatique HPC de microstructures granulaires
Jumeau numérique d'une expérience de chauffage laser sur un combustible nucléaire d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium
Analyse et compréhension du comportement thermomécanique des CERMET microcellulaires UO_2-Cr et UO_2-Mo
Evaluation des comportements thermohydraulique et thermomécanique d'aiguilles combustible de type RNR-Na
Assessment of SFR fuel pins thermal hydraulic and thermomecanical behaviours
Mise en place d'un outil de pré-conception pour la thermomécanique des assemblages combustibles RNR
Etudes thermomécaniques en support à la pré-conception du dispositif PRESTO de mesures de puissance résiduelle
Conception / Dimensionnement d'une source nucléaire pour le démarrage des futurs réacteurs
Dimensionnement d'un crayon expérimental et détermination des conditions d'irradiation à l'aide de l'Outil de Calcul Scientifique ALCYONE
Dimensionnement thermomécanique d'un dispositif de gestion de l'APRP pour crayon REP
Modélisation numérique de la transformation des matériaux sous irradiation: application au combustible nucléaire
Modeling material microstructure evolution under irradiation: the case of nuclear fuel
Simulation par champ de phase de la migration des porosités dans le combustible nucléaire
Phase field simulation of porosity migration in oxide nuclear fuels
Effet de la porosité sur la conductivité thermique du matériau combustible MOX (U,Pu)O2
Etude et simulation avec PLEIADES-GERMINAL de l'irradiation de transmutation PHENIX-SUPERFACT.
Simulation mécanique d'un assemblage combustible nucléaire sous sollicitations thermohydrauliques
Mechanical simulation of a nuclear fuel assembly under thermohydraulic stresses

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des combustibles / *Fuel Studies Departement*

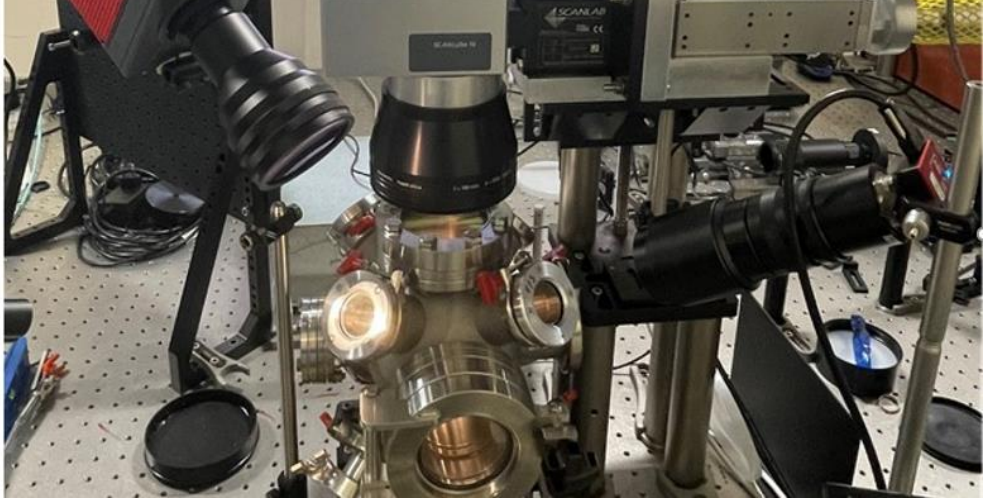
SESC – Service d'études et de simulation du comportement des combustibles.

Modélisation thermomécanique d'un combustible pour le réacteur expérimental RJH
Chaînage 1D-3D d'outils de calcul pour l'interprétation d'une irradiation de combustibles en réacteur à neutrons rapides
Identification d'une loi de comportement d'un matériau nucléaire avec incertitudes
Modélisation des interfaces U_3Si_2/Al avec des potentiels Machine Learning
Modeling U_3Si_2/Al Interfaces with Machine Learning Potentials
Simuler l'impact des défauts d'irradiation sur la conductivité thermique d'un combustible nucléaire
Simulating the impact of irradiation defects upon the nuclear fuel thermal conductivity
Modélisation de la diffusion aux joints de grains : équations aux dérivées partielles fractionnaires
Modeling grain boundary diffusion with fractional partial differential equations
Amélioration de l'analyse d'images MET de défauts étendus dans l'UO_2 par dynamique moléculaire Classique
Enhancing TEM Image Analysis of UO_2 Defects through Classical Molecular Dynamics
Modélisation micromécanique du comportement de matériaux composites aux interfaces imparfaites : application au combustible UO_2 irradié
Analyse numérique d'essais de rupture du dioxyde d'uranium par chauffe laser
Numerical analysis of uranium dioxide fracture tests induced by laser heating
Développement d'une approche monolithique HPC pour la simulation thermomécanique du comportement des combustibles nucléaires
Investigation d'un code aux éléments finis RATEL sur GPU et extension aux lois de comportements générés par Mfront
Implémentation de lois de comportement mécanique par différentiation automatique
Développement et vérification du code de thermomécanique Manta pour la simulation multiphysique des combustibles nucléaires
Optimisation de forme pour des combustibles innovants
Trains de Tenseurs Quantiques pour la simulation multiéchelle
Estimateur d'erreur à base d'ondelettes pour la mécanique des solides

S A 3 E

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

Analysis, Elaboration, Experimentation and Examination of Fuels Unit



Dispositif pour la caractérisation à haut débit de combustible nucléaire

DEC/SA3E/LAMIR

Dans le cadre du PEPR DIADEM (Programme et Equipement Prioritaires de Recherche pour l'accélération du développement de matériaux innovants), le SA3E développe une méthode de préparation d'échantillons de combustible nucléaire de petite taille par usinage laser, pour une caractérisation à haut débit. Le stage consistera à concevoir un porte-échantillon multiple adapté à ces échantillons et à le tester pour une caractérisation optique.

Le PEPR DIADEM vise à l'accélération de la recherche en sciences des matériaux. Un des axes de cette accélération est la production de données expérimentales à haut débit. Le SA3E a pour mission la caractérisation du combustible nucléaire, vierge ou irradié. Le SA3E s'inscrit dans la démarche de DIADEM en développant une méthode de production d'échantillons de combustible nucléaire de petite taille par usinage laser. Des premiers essais ont montré la faisabilité de cette approche. Il faut maintenant développer une méthodologie de mesure à haut débit adaptée à ces échantillons qui seront à terme réalisés à partir de combustible irradié.

L'objectif du stage vise à concevoir, puis faire réaliser un porte échantillon multiple et à l'utiliser pour une caractérisation optique haut débit d'échantillons de combustible non irradié.

Dans un premier temps, le stagiaire se formera, par compagnonnage, à l'usinage laser, la manipulation des échantillons en laboratoire haute activité et les mesures optiques sur combustible (conductivité thermique, absorption etc ...). Conscient de toutes ces contraintes d'environnement, il proposera un ou des concepts de porte-échantillons multiple. Une étude thermo-mécanique de ces concepts sera effectuée pour:

- Déterminer un mode de fixation des échantillons compatible avec les gradients de température induits par les mesures.
- Déterminer l'espacement des échantillons nécessaire pour que les mesures réalisées à hautes cadences n'interfèrent pas entre elles.

Le stagiaire réalisera des tests avec des modèles fabriqués par impression 3D, pour vérifier si ces pré-prototypes peuvent être manipulés en télé-opération, et identifier les adaptations nécessaires pour y parvenir.

Une fois le concept choisi, un prototype sera réalisé.

Le stage se déroulera sur les sites du CEA-Cadarache 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 :

Ecole d'ingénieur ou Master spécialité souhaitée: Physique/sciences des matériaux

- Durée du stage :

5/6mois

- Méthode/logiciel(s):

Conception sous SOLIDWORKS/ COMSOL

- Mots clés :

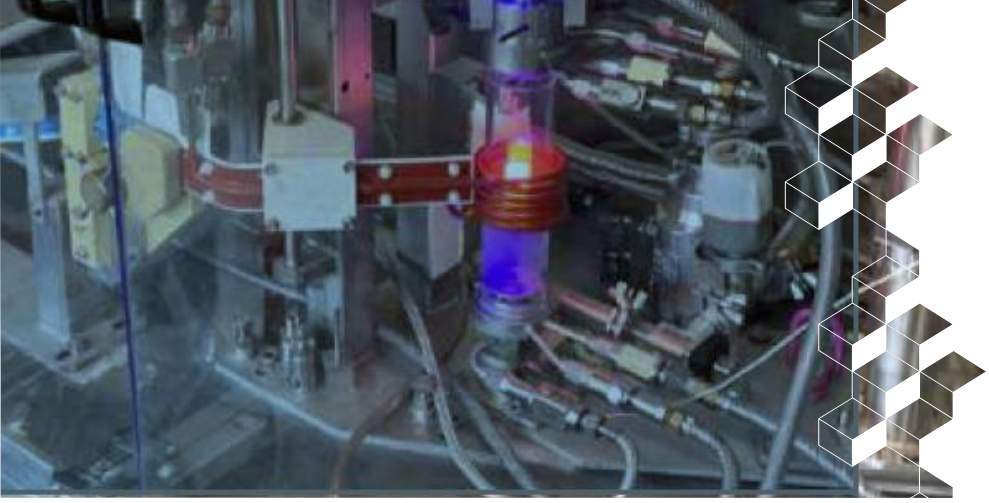
Mesure haut débit, laser, combustible nucléaire

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

DESGRANGES Lionel
Lionel.desgranges@cea.fr



Suivre au plus près le relâchement des gaz de fission hors du combustible nucléaire

DEC/SA3E/LAMIR

Le SA3E mène des études sur le relâchement des gaz de fission issus du combustible nucléaire pour améliorer la sûreté des réacteurs nucléaires. Le stage aura pour objectif de valider, par une approche expérimentale et théorique, une méthode de déconvolution des mesures de relâchement de gaz pour avoir une évaluation plus précise du relâchement de l'échantillon.

La prévention des accidents nucléaires est dimensionnée par une évaluation de la quantité des radionucléides potentiellement dispersables dans l'environnement pour une séquence accidentelle hypothétique. Le SA3E participe à cette évaluation en réalisant des mesures sur les radionucléides émis hors du combustible nucléaire lors d'un transitoire en température dans le dispositif MERARG. Comme les combustibles nucléaires sont irradiants, la mesure des radionucléides relâchés s'effectue hors des cellules hautes activités où le combustible est confiné. Ainsi pour connaître le relâchement des radionucléides au niveau du combustible à partir des données mesurées hors cellule, il est nécessaire de prendre en compte le transport des radionucléides dans les canalisations qui vont du four de traitement thermique jusqu'au détecteur. Nous avons choisi de prendre en compte ce mécanisme de transport avec le formalisme mathématique d'une fonction de transfert. Le but du stage est d'apporter une description aussi précise que possible de cette fonction de transfert.

Le stage comportera une partie expérimentale et une partie théorique.

Du point de vue expérimental, on s'appuiera sur l'installation EXPAT, dans laquelle une ligne gaz reproduisant celle du four MERARG a été installée. Le stagiaire devra effectuer des mesures de pression partielle d'oxygène en amont et en aval de chacun des éléments du circuit EXPAT.

A partir de ces données expérimentales, il construira la fonction de transfert de chacun de ces éléments, puis celle du circuit total par convolutions successives. La fonction de transfert EXPAT sera comparée à celle de MERARG, et éventuellement corrigée jusqu'à une quasi égalité des fonctions de transfert. La partie théorique se poursuivra en réalisant une déconvolution des résultats expérimentaux obtenus avec MERARG. L'objectif de cette dernière phase est d'évaluer jusqu'à quelle précision il est possible d'aboutir sur la courbe de relâchement des gaz de fission au niveau de l'échantillon.

Le stagiaire bénéficiera du support des techniciens et ingénieurs du laboratoire pour mener à bien son étude.

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 spécialité physique si possible

- Durée du stage :

>= 5 mois

- Méthode/logiciel(s):

Approche analytique et, en fonction des besoins, logiciel mathématique

- Mots clés :

Fonction de transfert, ligne gaz

- Possibilité de thèse :

NON

- Contact :

Desgranges Lionel
Lionel.desgranges@cea.fr

Comportement d'un combustible nucléaire au contact de sodium

DEC/SA3E/LAMIR

Le CEA mène des études sur l'interaction entre le combustible nucléaire et du sodium pour améliorer la sûreté des futurs réacteurs nucléaires de génération IV. Le stage aura pour objectif de caractériser expérimentalement au JRC-Karlsruhe un combustible ayant réagi avec du sodium dans une expérience précédente.

Le CEA étudie des projets de réacteurs nucléaires du futur, dits de génération IV, et plus particulièrement les réacteurs refroidis au sodium (SFR). Dans l'éventualité d'une rupture hypothétique de la gaine constituant l'aiguille combustible, la céramique nucléaire serait mise en contact avec le sodium. Le CEA et le JRC Karlsruhe ont lancé en commun une expérience dans laquelle un tronçon de combustible SFR a été mis en contact avec du sodium, pour étudier l'altération du combustible dans ces conditions. Ces données seront utilisées pour définir des procédures qui garantissent la sûreté du réacteur en cas de rupture de gaine.

Aujourd'hui, il y a au JRC-Karlsruhe plusieurs échantillons stockés dans le conteneur qui a servi à réaliser l'expérience d'interaction avec le sodium (voir image ci-dessous : à gauche un tronçon de combustible, à droite un conteneur). L'objectif du stage sera de participer à la campagne de caractérisation de ces échantillons au JRC-Karlsruhe, de collecter l'ensemble des résultats obtenus et d'en proposer une première interprétation. Pour ce faire le stagiaire séjournera à Karlsruhe pendant l'essentiel de la durée du stage. Il participera aux opérations de découpe du conteur et récupération de l'échantillon avec les techniciens des laboratoires haute activité. Il participera aussi à la campagne de caractérisation essentiellement par MEB avec l' équipe responsable de cet appareil.

Pour optimiser son séjour au JRC, le stagiaire passera au préalable quelques semaines à Cadarache pour étudier la bibliographie et partager avec ses encadrants les connaissances actuelles de l'interaction sodium-combustible. De même, il terminera son stage par une période à Cadarache où il présentera le résultats de ses travaux.

Le stagiaire devra avoir de bonnes connaissances en sciences des matériaux, physique ou chimie du solide. On attend de lui qu'il soit autonome et apte à travailler avec différentes équipes situées à Cadarache et à Karlsruhe.

- Formation souhaitée :

Master2 ou dernière année d'école d'ingénieur

Science des matériaux, Physique ou chimie du solide

- Durée du stage :

5-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Microscope Electronique à Balayage

- Mots clés :

Combustible irradié, Sodium, intéraction

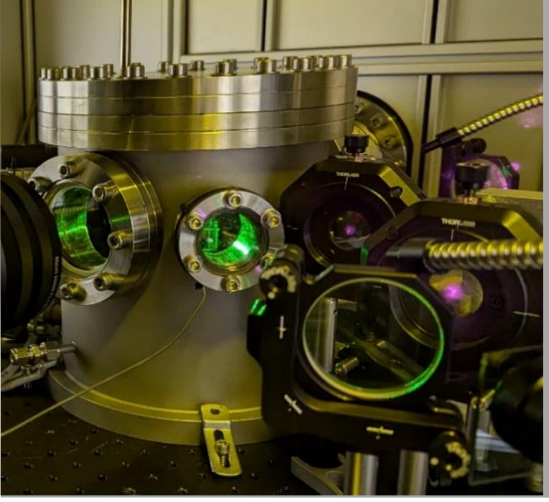
- Possibilité de thèse :

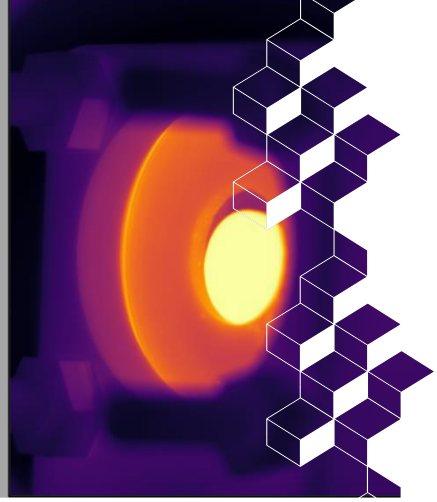
Non

- Contact :

DESGRANGES Lionel

Lionel.desgranges@cea.fr





Caractérisation des propriétés thermiques du dioxyde d'uranium par des techniques laser

DEC/SA3E/LAMIR

Dans le cadre des recherches sur le comportement des combustibles nucléaires, ce stage propose d'investiguer de nouvelles méthodes de quantification des propriétés thermiques basées sur l'utilisation du laser. Après un état de l'art et des simulations numériques, une validation expérimentale sera conduite sur une plateforme laser.

Dans le cadre général de la recherche sur la fission nucléaire, une meilleure compréhension du comportement du combustible à très haute température est nécessaire. L'évaluation de l'évolution des propriétés thermiques en fonction de la température, de la microstructure et du taux de combustion constitue un enjeu majeur, essentiel à la fois pour les réacteurs actuels et pour la conception des combustibles de demain.

Dans ce contexte général, et plus spécifiquement afin d'élargir la compréhension du comportement du combustible, ainsi que de ses propriétés thermophysiques, nous avons développé et qualifié des plateformes expérimentales basées sur des techniques laser. Ces développements expérimentaux sont complétés par des approches théoriques de l'interaction laser/matière.

À l'heure actuelle, l'étude des propriétés thermiques et de leur évolution en fonction de la température repose sur deux techniques laser complémentaires : (1) la méthode du flash laser, mesure sans contact permettant d'évaluer la réponse thermique d'un échantillon à l'échelle millimétrique ; (2) la microscopie infrarouge, qui permet de cartographier l'élévation de température en surface avec une résolution de quelques dizaines de microns grâce à un faisceau laser focalisé et modulé. Ces deux approches présentent chacune des atouts spécifiques ainsi que certaines limites, justifiant l'exploration de nouvelles voies expérimentales.

L'objectif principal de ce stage s'intègre dans cette démarche générale. Dans un premier temps, une étude bibliographique permettra de dresser l'état de l'art des approches existantes et d'évaluer leur potentiel d'application au cas du combustible nucléaire. La ou les techniques retenues feront ensuite l'objet de simulations numériques, afin de définir et de dimensionner les expériences à mettre en œuvre. Enfin, une expérimentation sera conduite sur la plateforme CHAUCOLASE de l'Institut Fresnel (Marseille) pour démontrer la faisabilité de la méthode sélectionnée.

Le stage se déroulera dans le cadre d'une collaboration entre le CEA Cadarache et l'Institut Fresnel à Marseille, pilotée au sein de la chaire MATLASE, où se trouvent les installations laser utilisées pour ce projet.

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur avec une spécialisation en photonique

M2 Physique avec une spécialisation en photonique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Plateforme laser

COMSOL Multiphysics

- Mots clés :

Optique, Laser, Matériaux

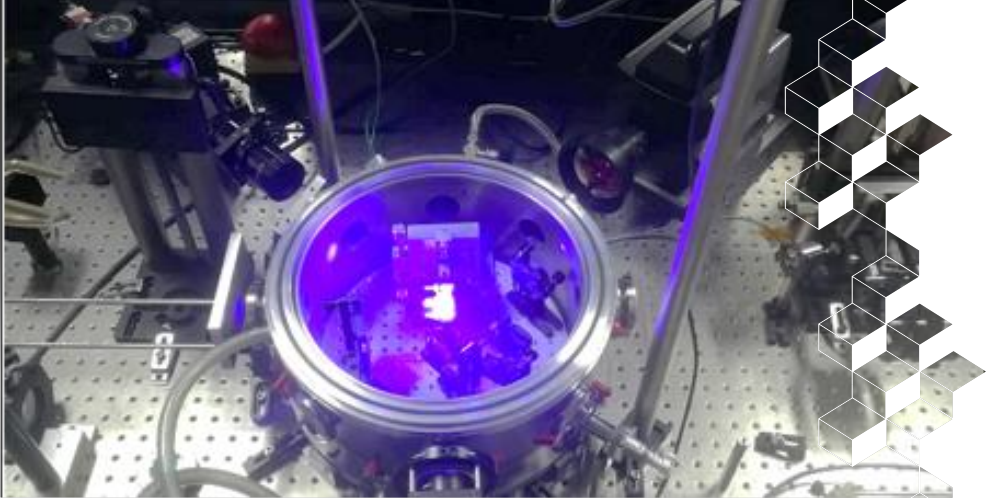
- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Thomas DOUALLE

thomas.doualle@cea.fr



Développement et qualification d'une expérience de chauffage laser pour l'étude du combustible nucléaire en situation accidentelle

DEC/SA3E/LAMIR

Le chauffage par laser haute-puissance est une technique expérimentale développée par le Département d'Etudes du Combustible qui permet d'induire des transitoires thermiques sur des échantillons de céramiques nucléaires. Elle permet notamment de reproduire à l'échelle du laboratoire les conditions thermo-mécaniques de séquences incidentelles ou accidentelles hypothétiques étudiées lors de l'analyse de sûreté des réacteurs de puissance du parc EdF.

Ce stage s'inscrit dans une démarche visant à améliorer la compréhension du comportement sous irradiation des combustibles nucléaires, notamment lors de scénarios incidentels ou accidentels hypothétiques. Pour ce faire, le Laboratoire d'Analyse des Radioélements (LAMIR) du Département d'Etude du Combustible (DEC) développe des techniques innovantes de chauffage laser haute puissance pour reproduire les conditions thermo-mécanique d'un accident sur un échantillon combustible. Le chauffage laser permet en effet de solliciter des échantillons sous des gradients thermiques spatiaux et temporels contrôlés afin d'étudier les mécanismes de base affectés. Ce travail de R&D est mené sur la plateforme expérimentale CHARTREUSE au CEA Cadarache ainsi que sur la plateforme pilote CHAUCOLASE à l'Institut Fresnel de Marseille.

L'une des situations accidentelles hypothétique particulièrement étudiée est l'Accident par Insertion de Réactivité (RIA). Ce transitoire est caractérisé par une élévation brutale et localisée de la température du combustible et par une perte d'intégrité plus ou moins localisée du combustible.

Les travaux de ce stage porteront sur l'exploration d'approches complémentaires à celle utilisée au sein du laboratoire pour étudier les RIA. L'objectif est de proposer une expérience innovante permettant d'étudier des phénomènes non reproduits à ce jour ou d'améliorer la représentativité des expériences de type RIA actuelles.

Pour ce faire, après une étude bibliographique, le ou la stagiaire devra proposer une étude préalable basée sur la simulation par éléments finis pour étudier les différents setups expérimentaux possibles. Cette étude portera à la fois sur le comportement thermique et mécanique de l'échantillon. Il devra ensuite mettre au point le banc expérimental et réaliser les expériences. Une comparaison simulation/expérience sera menée pour valider l'approche et les conditions thermo-mécaniques atteintes.

Ce stage sera mené dans un cadre collaboratif entre le LAMIR et l'équipe ILM (Interaction Laser Matière) de l'Institut Fresnel de Marseille, qui apportera son expertise dans le domaine des interactions laser de forte puissance/matériaux. L'étudiant aura à sa disposition l'ensemble des moyens expérimentaux nécessaires et pourra s'appuyer sur les compétences expérimentales et en simulations présentes au sein du laboratoire.

Une appétence à la fois pour la simulation et pour le travail expérimental est attendue. Une première expérience de travail avec des lasers serait un plus. Le stage se déroulant dans un environnement très collaboratif, une capacité de synthèse, de communication et d'échange sera nécessaire.

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur généraliste

M2 Physique

Spécialisation photonique ou mécanique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Plateforme laser

Eléments finis

- Mots clés :

Chauffage laser haute puissance, thermo-mécanique

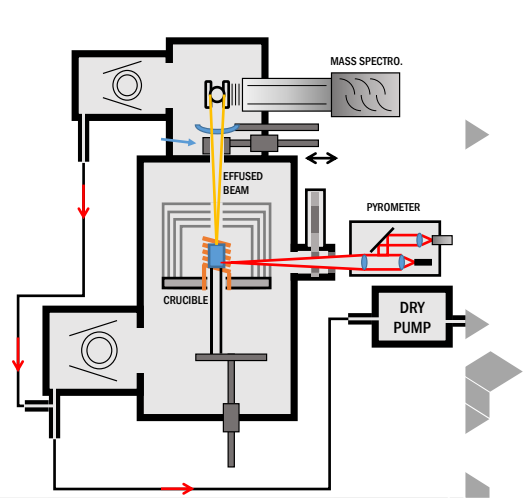
- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

REYMOND Matthieu

matthieu.reymond@cea.fr



Sur les traces des Xe et Cs échappés du 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 les deux sites du CEA-Cadarache et 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-Karsruhe où il restera la plus grande partie du stage. Là, il se familiarisera avec la cellule de Knudsen (KEMS), où un échantillon de combustible irradié de quelques milligrammes est chauffé sous vide. Le KEMS mesure la quantité des isotopes qui est relâchée en fonction du temps lors de la chauffe du combustible.

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. Il s'agit maintenant d'étendre ces résultats précédents 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 se terminera par un séjour d'une semaine au CEA-Cadarache où le stagiaire présentera ses travaux et les valorisera dans le contexte CEA.

- Formation souhaitée :

École d'ingénieur ou Master 2

Chimie-physique des matériaux

- Durée du stage :

5-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Tableur scientifique ORIGIN

- Mots clés :

Combustible nucléaire, Gaz de fission, Césium

- Possibilité de thèse :

NON

- Contact :

DESGRANGES Lionel

Lionel.desgranges@cea.fr

$$\mathbf{J}_q = \mathbf{L}_{qq} \cdot \nabla\left(\frac{1}{T}\right) + \mathbf{L}_{q\epsilon} \vdots \left(-\frac{1}{T}\nabla\sigma\right)$$

$$\mathbf{J}_\epsilon = \mathbf{L}_{\epsilon q} \cdot \nabla\left(\frac{1}{T}\right) + \mathbf{L}_{\epsilon\epsilon} \vdots \left(-\frac{1}{T}\nabla\sigma\right)$$

Evaluation quantitative du couplage thermo mécanique en Thermodynamique des Processus Irréversibles (TPI)

DEC/SA3E/LAMIR

Le LAMIR réalise des expériences pour simuler des transitoires de puissance rapides représentatifs de scenarii accidentels hypothétiques sur du combustible nucléaire. Une nouvelle approche théorique basée sur la TPI a mis en évidence des termes supplémentaires nécessaires pour les modéliser. Le stage vise à évaluer quantitativement ces termes.

Le stage se déroulera au CEA-Cadarache en collaboration avec le Professeur C. Goupil de l'université Paris-cité. Il s'agira dans un premier temps de se familiariser avec le formalisme de la TPI (Thermo-dynamique des Processus Irré-versibles) appliqué à la mécanique des milieux continus, sur la base d'un stage précédent réalisé sur le même sujet.

La partie principale du stage consistera en l'identification des termes de couplage et leur évaluation quantitative. Pour ce faire, on considérera différentes configurations simplifiées desquelles on déduira une expression analytique de ces coefficients de couplage, en fonction des grandeurs physiques du matériau étudié. Une évaluation de ces coefficients de couplage sera effectuée au moyen de ces expressions analytiques.

La seconde partie du stage consistera a évaluer l'impact effectif de ces coefficients de couplage dans des situations réelles. Pour cela, on s'appuiera sur des expériences de chauffage laser rapide réalisées au LAMIR sur des échantillons de combustible UO_2 non irradié. Il faudra conceptualiser ces expériences dans le formalisme de la TPI, puis interpréter les résultats en fonction des coefficients de couplage. Dans un deuxième temps on s'intéressera à la transposition en réacteur nucléaire de ces situations hypothétiques de transitoire thermique qui seront elles aussi conceptualisées avec le formalisme de la TPI. On évaluera comment la prise en compte du couplage thermomécanique en TPI est susceptible de modifier les résultats obtenus avec une modélisation utilisant un couplage thermomécanique faible.

En fonction du temps restant, on pourra s'attacher à étudier d'autres situations rencontrées à l'intérieur d'un réacteur nucléaire relevant de la TPI, ou bien débuter une modélisation numérique du couplage dans le scenario de transitoire rapide.

On attend du candidat qu'il ait une certaine agilité avec le formalisme tensoriel et un bon sens physique.

- Formation souhaitée :

Master 2 ou école d'ingénieur spécialité physique ou mécanique

- Durée du stage :

5-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Approche analytique et Formalisme tensoriel

- Mots clés :

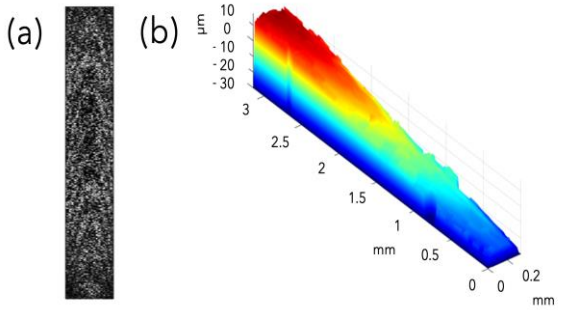
Couplage thermomécanique TPI

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

Desgranges Lionel
Lionel.desgranges@cea.fr



Interférométrie de speckle à deux longueurs d'onde avec décalage de phase par polarisation

Figure 1 : Mesure de preuve de concept. (a) franges de corrélation de speckle et (b) profil reconstruit. À noter : l'amplitude importante du profil, même en utilisant la lumière visible et le speckle (contrast faible).

DEC/SA3E/LAMIR

Dans le cadre de ses activités de recherche, le LAMIR est amené a accroitre l'instrumentation de ses dispositifs expérimentaux de traitements thermiques. Dans ce cadre général, le stage consistera à développer une nouvelle technique d'interférométrie, proposée conjointement par l'Institut Fresnel et le CEA, pour quantifier en temps réel les déformations subies par les échantillons en transitoires de température.

La quantification des déformations subies par des matériaux soumis à des conditions extrêmes (haute température, gradients thermiques, contraintes mécaniques) constitue un véritable challenge dans de nombreux domaines de la physique et est une donnée cruciale pour la validation des modèles thermomécaniques associés. Le problème majeur réside souvent dans l'inaccessibilité de l'échantillon aux capteurs classiques.

Pour appréhender cette problématique nous avons développé au LAMIR un dispositif (DURANCE) permettant de recréer ces contraintes à l'échelle du laboratoire. Le verrou technologique et scientifique était alors d'être en mesure de mesurer en ligne les déformations des gaines dues aux transitoires de température (TT). Pour le lever et obtenir des données sur l'évolution morphologique de la gaine au cours des TT, une instrumentation optique quantitative en temps réel basée sur l'interférométrie de speckle a été développée. Les potentialités de cette méthode, susceptible de mesurer des champs de déplacement d'une surface d'observation plein champ d'1cm*1cm et en quasi-temps réel, ont été évaluées lors de premiers travaux exploratoires menés conjointement par le LAMIR et l'Institut Fresnel. Toutefois, cette approche a montré ses limites notamment en terme de robustesse des mesures.

L'objectif de ce stage a trait principalement, pour lever ces verrous, à la mise en œuvre expérimentale (au travers d'expérimentations dédiées) et au développement de l'analyse numérique de donnés associée, d'une nouvelle technique d'interférométrie, proposée conjointement par l'Institut Fresnel et le CEA. Une première preuve de concept a, là aussi, déjà été réalisée ; nous souhaitons à présent valider la méthodologie de manière plus approfondie.

La technique proposée vise à mesurer et à suivre les déformations d'objets localisés en environnement contraint et peu accessible. Elle présente trois caractéristiques principales :

- Interférométrie de speckle [1] : il s'agit d'une technique permettant de mesurer des déformations, même lorsque l'objet testé diffuse la lumière et/ou se trouve derrière des milieux diffusants (l'interférogramme prend alors la forme d'un speckle, d'où son nom).
- Interférométrie à deux longueurs d'onde [2] : cette approche permet de créer une longueur d'onde synthétique plus grande, afin de mesurer de fortes déformations qui ne peuvent pas être détectées dans le spectre visible.
- Décalage de phase par polarisation (polarization phase stepping en anglais) [3] : cette méthode accélère l'acquisition en encodant la phase dans la structure de polarisation. Elle peut être réalisée sans éléments mobiles grâce à l'utilisation d'une caméra sensible à la polarisation

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master

spécialité souhaitée : Physique/Optique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Connaissances en optique et bases en programmation, intérêt pour le travail expérimental

- Mots clés :

interférométrie de speckle, instrumentation optique

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

Y. Pontillon / L. Gallais / L. Aleman-Castaneda

yves.pontillon@cea.fr / laurent.galais@fresnel.fr

[1]P. Jacquot, "Speckle interferometry: A review of the principal methods in use for experimental mechanics applications," in *Strain*, 2008. doi: 10.1111/j.1475-1305.2008.00372.x.
[2]U. P. Kumar, et al., "Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling," in Optics and Lasers in Engineering, 2009. doi: 10.1016/j.optlaseng.2008.04.005
[3]M. P. Kothiyal and C. Delisle, "Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter," *Applied Optics, 1985.* doi: 10.1364/AO.24.004439.

Dissolution d'alliage aluminium pour l'analyse du chlore stable

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'amélioration d'un protocole d'analyse adapté à l'analyse du chlore dans des matrices spécifiques.

L'une des techniques les plus utilisées pour doser le chlore stable est la chromatographie ionique (CI) qui est réalisée sur des échantillons en phase liquide. Les échantillons solides, tels que les alliages métalliques doivent donc passer au préalable par une étape de minéralisation avant de pouvoir être analysés par CI.

La maîtrise de l'analyse du chlore dans les alliages d'aluminium s'inscrit dans un contexte plus large de qualification des matériaux pour les réacteurs de recherche de nouvelle génération. Ceux-ci utiliseront en effet des alliages d'aluminium pour leurs structures internes critiques afin d'atteindre des flux neutroniques élevés. L'activation neutronique thermique du ^{35}Cl (isotope stable du chlore) produit le ^{36}Cl, un radionucléide à vie longue particulièrement préoccupant pour la gestion des déchets radioactifs. La caractérisation précise du contenu en chlore de ces matériaux est ainsi essentielle pour prédire leur comportement sous irradiation et optimiser la gestion des déchets radioactifs produits.

L'objectif de ce stage est d'optimiser un protocole de minéralisation d'échantillons d'alliage aluminium dans le but de déterminer la quantité de chlore constitutive de cet alliage. Les difficultés majeures étant de limiter les sources potentielles de pollution en chlore durant l'ensemble du processus, et de réussir à doser le chlore stable dans une matrice très complexe.

Les principales missions de ce stage pourront inclure :

- une recherche bibliographique,
- La rédaction d'un plan d'expérience
- Des tests de minéralisation suivant différents protocoles
- Le dosage du chlore par IC ou IC-MS (chromatographie ionique couplée à la spectrométrie de masse)
- Des essais préliminaires sur des matrices réelles
- Optimisation de la méthode
- Validation de la méthode

Apport du stage pour le/la candidat(e)

A l'issue de ce stage, le stagiaire disposera d'une expérience de recherche en chimie analytique complète, dans la mesure ou il devra faire intervenir à la fois des techniques de recherche bibliographique, de préparation d'échantillons, de séparation et d'analyse, ainsi qu'une démarche expérimentale de validation de méthode.

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 3ème année d'école d'ingénieurs

- Durée du stage :

6-7 mois

- Méthode/logiciel(s):

Minéralisation via différentes techniques
Dosage du chlore par IC ou IC-MS

- Mots clés :

Chromatographie ionique, spectrométrie de masse, matrices complexes

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

MARIA Emmanuelle
emmanuelle.maria@cea.fr

Dosage d'acides organiques dans des matrices complexes par IC-MS

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 la transposition d'une méthode d'analyse à un nouvel appareillage (IC-MS)

Les petits acides organiques à chaîne courte, présents naturellement ou générés par radiolyse des matériaux organiques dans les déchets, favorisent la complexation avec les radionucléides tels que l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs. Cette complexation modifie la spéciation des radionucléides et peut accroitre leur solubilité et leur mobilité dans l'environnement, influençant ainsi la dispersion potentielle des contaminants radioactifs autour des sites de stockage. Leur présence nécessite donc une gestion adaptée lors du traitement et du conditionnement des déchets radioactifs pour limiter les risques de migration des radionucléides.

Les petits acides organiques les plus souvent détectés dans les déchets nucléaires sont le formiate, l'acétate et l'oxalate. Ils sont principalement produits par la radiolyse de l'eau en présence de carbonates ou par la décomposition de matériaux organiques présents dans les déchets.

L'objectif de ce stage est l'analyse des petits acides organiques via l'IC-MS (Ion Chromatography - Mass Spectrometry) qui combine la séparation ionique offerte par la chromatographie ionique avec la haute sensibilité et la spécificité de la spectrométrie de masse. Cette technique permet :

- de détecter simultanément plusieurs espèces (acides organiques et ions majeurs/minoritaires) dans des matrices complexes,
- une quantification précise même à des niveaux de trace.

Les principales missions de ce stage pourront inclure :

- une recherche bibliographique,
- La rédaction d'un plan d'expérience
- Le développement d'une méthode chromatographique et spectrométrique (choix des paramètres d'injection, de la colonne, conditions de séparation et d'ionisation…)
- Essais préliminaires sur des matrices réelles
- Optimisation de la méthode
- Validation de la méthode

Apport du stage pour le/la candidat(e)

A l'issue de ce stage, le stagiaire disposera d'une expérience de recherche en chimie analytique complète, dans la mesure il devra faire intervenir à la fois des techniques de recherche bibliographique, de préparation d'échantillons, de séparation et d'analyse, ainsi qu'une démarche expérimentale de validation de méthode.

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 3ème année d'école d'ingénieure

- Durée du stage :

5-7 mois

- Méthode/logiciel(s):

Couplage IC-MS

- Mots clés :

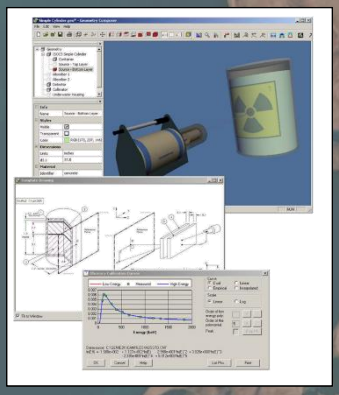
Chromatographie ionique, spectrométrie de masse, matrices complexes

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

MARIA Emmanuelle
emmanuelle.maria@cea.fr



Analyse du ^{137}Cs et du ^{210}Pb dans des échantillons de sédiments lacustres

DEC/SA3E/LARC

Ce stage, au sein du Laboratoire d'Analyses Radiochimiques et Chimiques (LARC), a pour but le développement et la validation d'une méthode d'analyse du césium 137 (^{137}Cs) et du plomb 210 (^{210}Pb) par spectrométrie gamma (calibration LabSOCS) dans des échantillons de sédiments lacustres.

Contexte

Le LARC apporte son expertise et un soutien analytique dans les domaines des réacteurs, du combustible, des déchets et de l'assainissement-démantèlement, en développant et en réalisant des analyses radiochimiques et chimiques.

Pour l'analyse des radioéléments par spectrométrie gamma, le laboratoire dispose depuis 2022 d'un détecteur HPGe coaxial modèle GC5019, et depuis 2024 d'un détecteur HPGe coaxial modèle GC10020. Ces deux détecteurs ont été caractérisés par MIRION afin de pouvoir utiliser le logiciel de calibration LabSOCS, applicable pour les énergies comprises entre 70 à 7000 keV.

Néanmoins, la méthode actuellement utilisée pour la calibration et l'obtention de résultats quantifiables repose sur un étalonnage externe (solution multigamma). Cette méthode implique que l'échantillon analysé soit sous la même géométrie que la solution d'étalonnage, à savoir un liquide de densité proche de 1 (50 mL ou 500 mL). L'étalonnage via LabSOCS permet de s'abstenir de ces,contraintes géométriques et d'analyser des échantillons sous différentes formes.

L'objectif principal de ce stage est donc le développement et la validation de l'analyse par spectrométrie gamma de différents radioéléments en utilisant la calibration LabSOCS. Le/la stagiaire se concentrera principalement sur l'analyse du ^{137}Cs (662 keV) et du ^{210}Pb (47 keV) dans des échantillons de sédiments lacustres dont la composition chimique a déjà été préalablement déterminée.

Objectifs

La liste (non exhaustive) des objectifs par ordre de priorité est la suivante :

- Prise en main du logiciel LabSOCS (création de géométries, implémentation des données échantillons) ;
- Comparaison des résultats d'analyse (^{137}Cs) obtenus par étalonnage externe et par étalonnage LabSOCS sur des échantillons de différentes matrices (eau, graphite, béton) ;
- Détermination de la géométrie et des paramètres LabSOCS pour l'analyse d'échantillons de sédiments lacustres lyophilisés et broyés (support, masse, temps d'analyse, composition chimique, densité) ;
- Evaluation des limites de détection, des activités et des incertitudes associées pour la détermination de l'activité en ^{137}Cs et en ^{210}Pb ;
- Comparaison interlaboratoire pour la validation de la méthode d'analyse ;
- Rédaction d'une méthode d'analyse en spectrométrie gamma avec utilisation du logiciel LabSOCS.

Apport du stage pour le/la candidat(e)

A l'issue de ce stage, le/la stagiaire aura acquis une expérience opérationnelle dans le domaine de la mesure du rayonnement gamma par spectrométrie gamma.

Le développement et la validation d'une nouvelle méthode de calibration par l'utilisation du logiciel LabSOCS, notamment via des comparaisons inter-échantillons et interlaboratoires, lui permettront de développer son esprit critique.

Enfin, ce stage s'inscrit dans un projet plus global de thèse intitulé « *Marqueurs radiologiques en Antarctique : développement et validation des méthodologies d'analyse associées* ». Ce projet a pour but le développement et l'optimisation de méthodes analytiques pour l'analyse de marqueurs radiologiques (i.e. ^{137}Cs, ^{210}Pb, U, ^{239}Pu/^{240}Pu, alpha/bêta total) en s'appuyant sur des collaborations internes (LANIE, LEXAN) et externes (CSIC, CIEMAT). L'application de ces méthodes à des échantillons de matrices variées prélevés en Antarctique permettra d'investiguer la distribution spatiale et l'origine de ces marqueurs radiologiques. L'analyse du ^{210}Pb et du ^{137}Cs permettra de dater les carottes sédimentaires prélevées dans le cadre de ce projet doctoral.

La maitrise de l'anglais est indispensable. Des notions en espagnol sont appréciées.

Références

[1] HORDA Group, B. Oliva-Urcia, A. Moreno, et al. « Last Deglaciation and Holocene Environmental Change at High Altitude in the Pyrenees: The Geochemical and Paleomagnetic Record from Marboré Lake (N Spain) ». *Journal of Paleolimnology* 59, nº 3 (2018): 349-71. https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9.

[2] Długosz-Lisiecka, Magdalena, et Henryk Bem. « Fast Procedure for Self-Absorption Correction for Low γ Energy Radionuclide 210Pb Determination in Solid Environmental Samples ». *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 298, nº 1 (2013): 495-99. https://doi.org/10.1007/s10967-012-2404-8.

[3] Suárez-Navarro, J.A., A.M. Moreno-Reyes, C. Gascó, M.M. Alonso, et F. Puertas. « Gamma Spectrometry and LabSOCS-Calculated Efficiency in the Radiological Characterisation of Quadrangular and Cubic Specimens of Hardened Portland Cement Paste ». *Radiation Physics and Chemistry* 171 (juin 2020): 108709. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108709.

[4] Barba-Lobo, A., V.M. Expósito-Suárez, J.A. Suárez-Navarro, et J.P. Bolívar. « Robustness of LabSOCS Calculating Ge Detector Efficiency for the Measurement of Radionuclides ». *Radiation Physics and Chemistry* 205 (avril 2023): 110734. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110734.

- **Formation souhaitée :**

Master 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur

Parcours en chimie analytique

- **Durée du stage :**

4 – 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Spectrométrie gamma, logiciels Genie 2000 et LabSOCS

- **Mots clés :**

Chimie analytique, spectrométrie gamma, césium 137, plomb 210, sédiments

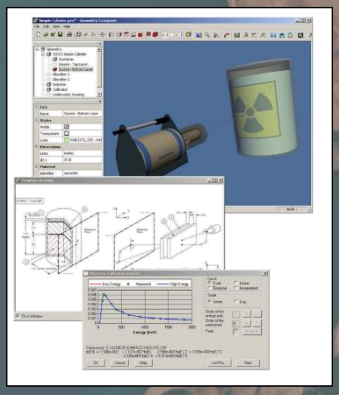
- **Possibilité de thèse :**

Oui

- **Contact :**

DUVAL Bastien

Bastien.DUVAL@cea.fr



Analysis of ^{137}Cs and ^{210}Pb in Lake Sediment Samples

DEC/SA3E/LARC

This internship, within the Laboratory of Radiochemical and Chemical Analyses (LARC), aims to develop and validate an analytical method for cesium-137 (^{137}Cs) and lead-210 (^{210}Pb) using gamma spectrometry with LabSOCS calibration in lake sediment samples.

Context

The LARC provides expertise and analytical support in the fields of nuclear reactors, fuel, waste, and decommissioning by developing and performing radiochemical and chemical analyses.

For the analysis of radionuclides by gamma spectrometry, the laboratory has been equipped since 2022 with a GC5019 coaxial HPGe detector and since 2024 with a GC10020 coaxial HPGe detector. These two detectors have been characterized by MIRION, enabling the use of the LabSOCS calibration software, applicable for energies ranging from 70 to 7000 keV.

However, the current method for calibration and obtaining quantifiable results relies on an external calibration (multi-gamma solution). This method requires that the analyzed sample be in the same geometry as the calibration solution — that is, a liquid with a density close to 1 (50 mL or 500 mL). Using LabSOCS for calibration eliminates these geometric constraints, allowing for the analysis of samples in various forms.

The main objective of this internship is therefore to develop and validate gamma spectrometry analysis of various radionuclides using LabSOCS calibration. The intern will focus primarily on the analysis of ^{137}Cs (662 keV) and ^{210}Pb (47 keV) in lake sediment samples, whose chemical composition has already been previously determined.

Objectives

The (non-exhaustive) list of prioritized objectives is as follows:

- Familiarization with the LabSOCS software (geometry creation, implementation of sample data);
- Comparison of ^{137}Cs analysis results obtained via external calibration and LabSOCS calibration on samples of various matrices (water, graphite, concrete);
- Determination of geometry and LabSOCS parameters for the analysis of freeze-dried and ground lake sediment samples (support, mass, analysis time, chemical composition, density);
- Evaluation of detection limits, activities, and associated uncertainties for the determination of ^{137}Cs and ^{210}Pb activity;
- Interlaboratory comparison for method validation;
- Drafting of a gamma spectrometry analytical method using the LabSOCS software.

Internship Benefits for the Candidate

By the end of this internship, the candidate will have gained hands-on experience in the field of gamma radiation measurement using gamma spectrometry.

The development and validation of a new calibration method through the use of the LabSOCS software — particularly through inter-sample and interlaboratory comparisons — will foster the intern's critical thinking skills.

Finally, this internship is part of a broader PhD project entitled "Radiological Markers in Antarctica: Development and Validation of Associated Analytical Methodologies". This project aims to develop and optimize analytical methods for the analysis of radiological markers (i.e., ^{137}Cs, ^{210}Pb, U, ^{239}Pu/^{240}Pu, total alpha/beta), through both internal (LANIE, LEXAN) and external (CSIC, CIEMAT) collaborations. Applying these methods to various matrix samples collected in Antarctica will help investigate the spatial distribution and origin of these radiological markers. The analysis of ^{210}Pb and ^{137}Cs will be used to date the sediment cores collected as part of this PhD project.

A good command of English is essential. Knowledge of Spanish is an asset.

References

[1] HORDA Group, B. Oliva-Urcia, A. Moreno, et al. « Last Deglaciation and Holocene Environmental Change at High Altitude in the Pyrenees: The Geochemical and Paleomagnetic Record from Marboré Lake (N Spain) ». *Journal of Paleolimnology* 59, nº 3 (2018): 349-71. https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9.

[2] Długosz-Lisiecka, Magdalena, et Henryk Bem. « Fast Procedure for Self-Absorption Correction for Low γ Energy Radionuclide 210Pb Determination in Solid Environmental Samples ». *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 298, nº 1 (2013): 495-99. https://doi.org/10.1007/s10967-012-2404-8.

[3] Suárez-Navarro, J.A., A.M. Moreno-Reyes, C. Gascó, M.M. Alonso, et F. Puertas. « Gamma Spectrometry and LabSOCS-Calculated Efficiency in the Radiological Characterisation of Quadrangular and Cubic Specimens of Hardened Portland Cement Paste ». *Radiation Physics and Chemistry* 171 (juin 2020): 108709. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108709.

[4] Barba-Lobo, A., V.M. Expósito-Suárez, J.A. Suárez-Navarro, et J.P. Bolívar. « Robustness of LabSOCS Calculating Ge Detector Efficiency for the Measurement of Radionuclides ». *Radiation Physics and Chemistry* 205 (avril 2023): 110734. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110734.

- **Formation souhaitée :**

Master's degree (final year) or 3rd year of engineering school, with a focus on analytical chemistry

- **Durée du stage :**

4 – 6 months

- **Méthode/logiciel(s):**

Gamma spectrometry, Genie 2000 and LabSOCS software

- **Mots clés :**

Analytical chemistry, gamma spectrometry, cesium-137 (^{137}Cs), lead-210 (^{210}Pb), lake sediments

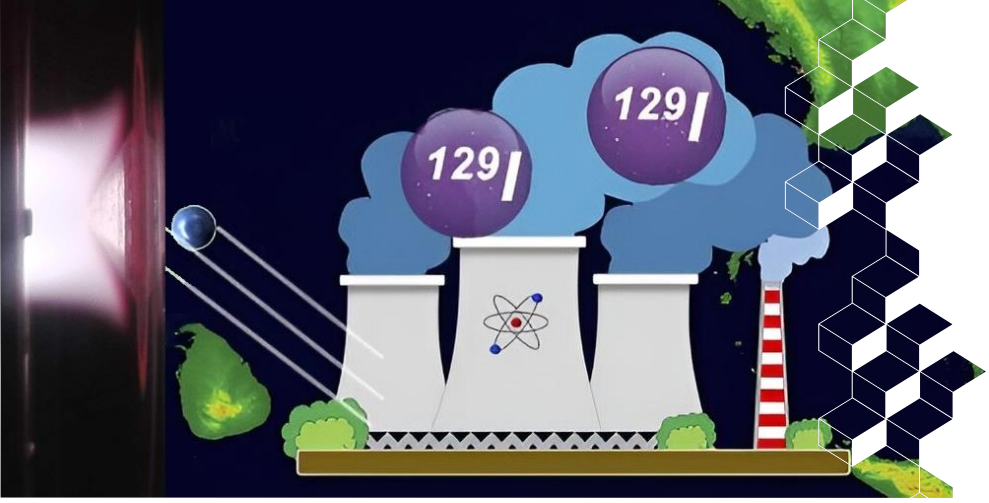
- **Possibilité de thèse :**

Yes

- **Contact :**

DUVAL Bastien

Bastien.DUVAL@cea.fr



Analyse de l'iode 129 dans des déchets nucléaires solides

DEC/SA3E/LARC

Ce stage, au Laboratoire d'Analyses Radiochimiques et Chimiques, a pour but d'optimiser une méthode d'analyse de l'iode 129 dans des échantillons de déchets nucléaires solides. Le cœur de ce travail s'articulera autour de la préparation des échantillons et de la préconcentration de l'iode en amont des analyses ICP-MS.

Contexte :

L'industrie nucléaire produit des déchets qui nécessitent d'être caractérisés avant leur traitement, en particulier, les concentrations de certains radionucléides doivent être déterminées. L'iode 129 est un radionucléide à vie longue produit lors de la fission de l'uranium qui possède un fort potentiel de mobilité dans l'environnement de par ses propriétés physico-chimiques. Par conséquent, des mesures relatives à l'^{129}I sont nécessaires pour la gestion du stockage des déchets nucléaires et pour la surveillance de l'environnement. Dans ce cadre, le Service d'Analyses, d'Elaboration, d'Expérimentation et d'Examens du combustible (SA3E) dispose d'un Laboratoire d'Analyses Radiochimiques et Chimiques (LARC) qui met au point des méthodes d'analyse pour répondre aux spécifications des filières de traitement des déchets radioactifs.

La mise au point d'une méthode de quantification de l'iode 129 dans les déchets solides (bétons, cendres, mâchefers…) permettra de répondre aux enjeux relatifs au devenir des déchets de l'industrie nucléaire.

Objectifs et missions du stage :

- Optimisation et validation d'une méthode d'extraction de l'iode pour des échantillons de béton

Une méthode par lixiviation alcaline a précédemment été mise au point pour l'extraction de l'iode dans des échantillons de béton. Le premier objectif du stage sera de déterminer expérimentalement les conditions d'extraction (température, rapport solide/liquide) optimales pour l'analyse de l'iode.

- Optimisation et validation d'une méthode d'extraction de l'iode pour des échantillons de cendres

La méthode par lixiviation alcaline sera étendue à l'analyse d'échantillons de cendres et comparée à une minéralisation acide en micro-onde.

- Mise au point d'une méthode de préconcentration de l'iode

Les échantillons faiblement concentrés nécessitent une étape de préconcentration de l'iode. Les conditions de préconcentration seront optimisées en utilisant des solutions dopées en iode stable (^{127}I).

Missions principales :

- **Contribution à la construction d'une démarche expérimentale** à partir des premiers résultats déjà obtenus au laboratoire, et en s'appuyant sur la littérature scientifique.

- **Optimisation de l'extraction et de la préconcentration de l'iode en utilisant les outils du laboratoire.**

- Caractérisation de solutions par ICP-AES, ICP-MS, chromatographie ionique…

- **Quantification de l'iode 129 par ICP-MS/MS** après préparation des étalons et des échantillons.

- **Analyse et interprétation des résultats obtenus.**

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

A l'issue de ce stage, le stagiaire disposera d'une expérience de recherche en chimie analytique complète, dans la mesure où ce stage fait intervenir à la fois des techniques de mise en solution d'échantillons, de séparation et d'analyse, ainsi qu'une démarche expérimentale de validation de méthode.

Ce projet de stage se déroulant dans une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, vous serez familiarisé(e) avec une pratique de travail en laboratoire mettant en œuvre des échantillons radioactifs.

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

Références

[1] IRESNE - LARC

[2] Carrier *et al.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2023)

[3] Nottoli *et al.* Applied Radiation and Isotopes (2014)

[4] Llopart-Babot *et al.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2022)

- **Formation souhaitée :**

Master 2 ou école d'ingénieurs en chimie analytique

- **Durée du stage :**

4 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Minéralisation micro-onde, ICP-MS, extraction en liquide-solide, chromatographie préparative

- **Mots clés :**

Chimie analytique, caractérisation, déchets nucléaires, chromatographie, spectrométrie de masse

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

Mathieu MARTINEZ

mathieu.martinez@cea.fr

Qualification du nouveau spectromètre à scintillation liquide HIDEX 300 SLL

DEC / SA3E / LARC

Dans le but d'assurer les missions du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, le Laboratoire d'Analyse Radiochimique et Chimique réalise de nombreuses analyses, à l'aide d'appareils à la pointe de la technologie. Ce stage a pour but la qualification d'un nouveau spectromètre à scintillation liquide : HIDEX 300 SLL.

Le laboratoire C5 fait partie du pôle radiochimie du LARC, et est situé dans l'INB CHICADE au bâtiment 326. Il apporte son expertise dans le domaine du combustible, des réacteurs, et principalement dans le domaine des déchets et de l'assainissement démantèlement.

Pour cela, l'analyse des radionucléides émetteurs béta est primordiale, notamment l'analyse des radionucléides BVL (béta vie longue), comme le carbone 14 et le chlore 36.

Jusqu'en 2025, ces analyses étaient réalisées sur un spectromètre de la marque Perkin Elmer TRICARB 2910 TR, et sur le Perkin Elmer Quantulus du bâtiment 152 pour les analyses bas niveaux.

En 2025, le laboratoire C5 a fait l'acquisition d'un nouveau spectromètre à scintillation liquide bas niveau, de la marque HIDEX 300SLL.

L'objectif de ce stage est la qualification de cet appareil, afin de pouvoir assurer l'analyse qualitative et quantitative des différents radionucléides émetteurs Béta régulièrement analysés au laboratoire : ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{241}Pu, ^{63}Ni, ^{90}Sr. Les missions de ce stage comportent :

- La réalisation des courbes de calibration, dites courbes de quenching, pour tous les radionucléides cités précédemment.
- La vérification de ces courbes à l'aide d'étalons certifiés, par calculs d' écarts normalisés.
- La mise en place des protocoles d'analyses, avec calculs d'incertitudes et de limites de détection, en suivant la norme iso 9698.
- La vérification de ces protocoles avec des échantillons réels connus.
- La rédaction d'un mode opératoire.

Par la suite, si les délais le permettent, le stagiaire pourra commencer le développement analytique concernant l'analyse du samarium 151, afin d'ajouter celui-ci à la liste des radionucléides mesurables au laboratoire

<u>Apport du stage pour le/la candidat(e)</u>

A l'issue de ce stage, le stagiaire disposera d'une expérience de recherche en chimie analytique (radiochimie), dans la mesure où il devra faire intervenir à la fois des techniques de préparation d'échantillons, de séparation et d'analyse, ainsi qu'une démarche expérimentale de qualification d'appareil de mesure.

Ce projet de stage se déroulant dans une Installation Nucléaire de Base, le stagiaire apprendra à travailler en laboratoire sur des échantillons radioactifs, en suivant les règles de sécurité et de sureté liées à ce type d'installation.

- Formation souhaitée :

IUT ou BTS chimie ou métier de la mesure

- Durée du stage :

16 semaines

- Méthode/logiciel(s):

HIDEX 300 SLL

- Mots clés :

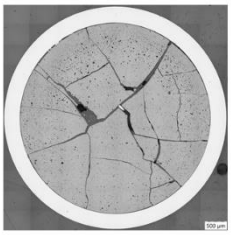
Scintillation liquide,
Emetteurs béta,
Radionucléides

- Possibilité de thèse :

Non

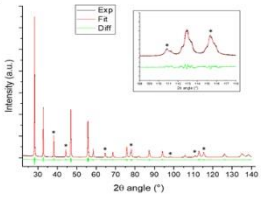
- Contact :

Moinot Julien
julien.moinot@cea.fr

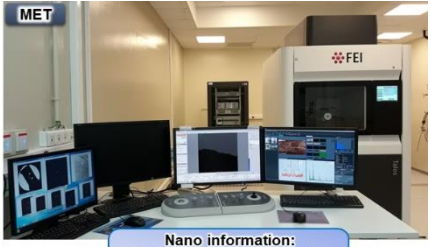


Céramographie d'une coupe radiale sur un combustible MOX irradié.

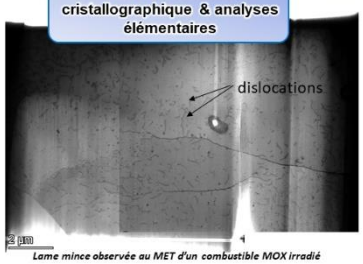
Structure cristallographique



Exemples de diffractogrammes sur MOX



Nano information: cristallographique & analyses élémentaires



Lame mince observée au MET d'un combustible MOX irradié

« Comprendre le cœur du combustible : quand les défauts atomiques dictent les propriétés macroscopiques »

DEC/SA3E/LCPC

Ce stage de niveau Master 2 a pour objectif d'investiguer un éventuel lien entre la présence des défauts d'irradiation, observés à l'échelle nanométrique dans le combustible irradié et les paramètres cristallins mesurés à l'échelle micrométrique. Les travaux seront réalisés au sein d'un laboratoire de caractérisation des combustibles irradiés, unique en France, doté d'instruments de pointe permettant des analyses multi-échelles de haute précision.

Contexte scientifique : Avec l'émergence de nouvelles start-ups dans le domaine du nucléaire, notamment autour du développement de technologies innovantes pour les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR), il devient essentiel d'élargir la base de validation des codes de performance du combustible. En particulier, les régimes de fonctionnement à plus faible puissance linéique — encore peu étudiés — suscitent un intérêt croissant. À ces puissances réduites, les températures atteintes dans le combustible sont significativement plus basses que celles observées lors des irradiations conventionnelles. Ce changement de régime thermique induit une microstructure d'irradiation radicalement différente: en l'absence de température suffisante, la formation d'un trou central ou de grains colonnaires, typiques des fortes puissances linéiques, est inhibée. Par ailleurs, ces conditions entraînent une réduction du relâchement des gaz de fission (RGF), susceptible de provoquer un gonflement gazeux accru. Simultanément, l'efficacité du recuit thermique des défauts étant plus faible, la densité des défauts d'irradiation (notamment les dislocations) tend à augmenter, contribuant également au gonflement du combustible.

Objectif du stage : Ce stage vise à améliorer la compréhension des mécanismes de gonflement du combustible induits par les défauts d'irradiation dans ces régimes atypiques de fonctionnement. Pour cela, une approche combinée reposant sur la Diffraction des Rayons X (DRX) et la Microscopie Électronique en Transmission (MET) sera mise en œuvre. Cette méthodologie permettra :
- d'évaluer le gonflement cristallin à partir des variations de la position, de la largeur à mi-hauteur et de l'intensité des pics sur les diffractogrammes,
- et de quantifier la densité de dislocations via l'analyse des lames minces préparées pour l'analyse par MET.

Ces analyses seront effectuées à différentes positions radiales dans le combustible irradié. Ce dernier, soumis à un gradient thermique marqué entre son centre et sa périphérie, offre un cas d'étude particulièrement pertinent pour analyser l'évolution de la densité des dislocations.

Déroulement du stage :

- ***Revue bibliographique*** sur les phénomènes de gonflement et de défauts d'irradiation à basse T dans les combustibles RNR;
- ***Optimisation des paramètres d'acquisition DRX*** (taille du faisceau, temps d'acquisition, résolution angulaire…);
- ***Préparation métallographique spécifique*** de l'échantillon pour l'analyse par DRX;
- ***Acquisition des diffractogrammes*** à différentes positions radiales;
- ***Préparation des lames minces*** pour la caractérisation par MET en utilisant le MEB-FIB;
- ***Caractérisation MET*** des lames minces pour mesurer la densité de dislocations;
- ***Analyse et interprétation des résultats***, en vue de corréler les caractérisations DRX et MET.

Ces résultats serviront de base à un travail de doctorat visant à approfondir le comportement sous irradiation de tels combustibles.

- Formation souhaitée :

Troisième année d'école d'ingénieur généraliste ou Master 2 physique, sciences physiques.

- Durée du stage :

5- 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Analyse d'images MET par IA, logiciels TOPAS/EVA pour DRX

- Mots clés :

MOX, défauts d'irradiation, DRX, MET

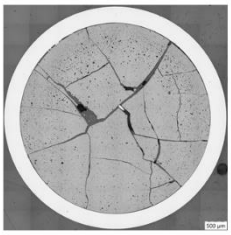
- Possibilité de thèse :

OUI

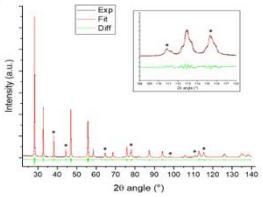
- Contact :

SABATHIER Cathy/
FOUQUET-METIVIER Pauline

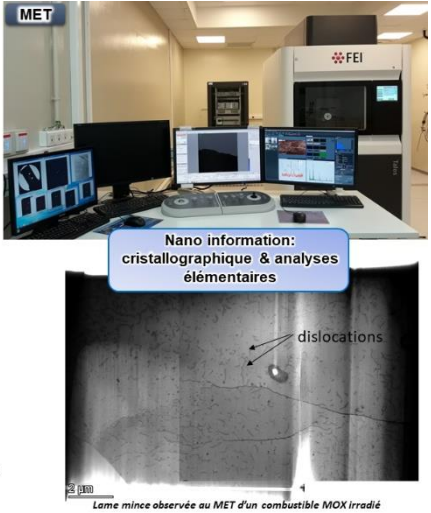
Catherine.sabathier@cea.fr



Céramographie d'une coupe radiale sur un combustible MOX irradié.



Exemples de diffractogrammes sur MOX



Lame mince observée au MET d'un combustible MOX irradié

« Understanding the fuel core: when atomic defects dictate macroscopic properties »

DEC/SA3E/LCPC

The objective of this second-year Master's internship is to investigate a potential correlation between irradiation defects, observed on a nanometric scale in irradiated fuel, and the crystalline parameters measured on a micrometric scale. This work will be conducted in an irradiated-fuel characterization laboratory, the only one of its kind in France. This laboratory is equipped with cutting-edge instruments that enable high-precision, multi-scale analyses.

Scientific context: The emergence of new start-ups in the nuclear field, particularly those focused on developing innovative technologies for Fast Neutron Reactors (FNR), makes it essential to expand the validation of Fuel Performance Codes. Operating regimes at lower linear powers, that have not yet been studied, are of particular interest. At these reduced powers, the temperatures reached in the fuel are significantly lower than those observed during conventional irradiation. This change in the thermal regime results in a significantly different irradiation microstructure. In case of lower reached temperatures, the formation of a central hole or columnar grains, which are typical of irradiation at higher linear powers, is inhibited. Additionally, these conditions reduce the release of fission gases (FGR), likely causing an increase in the gaseous swelling. At the same time, the thermal annealing efficiency of defects is lower, so the density of irradiation defects (particularly dislocations) increases, contributing to fuel swelling.

Internship objectives: The goal of this internship is to improve our understanding of the fuel swelling mechanisms induced by irradiation defects in these atypical operating regimes. To this end, a combined approach based on X-Ray Diffraction (XRD) and Transmission Electron Microscopy (TEM) will be used. This methodology will enable to:
- evaluate the lattice swelling based on variations of the position, full width at half maximum and intensity of the peaks on diffractograms,
- quantify the density of dislocations by analyzing lamellae by TEM.

These analyses will be carried out at different radial positions in the irradiatied fuel. The latter provides a particularly relevant case study for analysing the variation of the density of dislocations, as it is subjected to a significant thermal gradient between its centre and its periphery.

Course of the internship:

- ***Literature review*** on swelling phenomena and irradiation defects at low temperatures in FNR fuels
- ***Optimisation of XRD acquisition parameters*** (e.g. beam size, acquisition time, angular resolution…);
- ***Specific metallographic preparation*** for XRD analysis;
- ***Acquisition of diffractograms*** at differents radial positions;
- ***Preparation of lamellae*** using FIB-SEM for TEM characterizations;
- ***TEM characterizations*** of the lamellae to measure the dislocation density;
- ***Analysis and interpretation*** of the results, to correlate the XRD and TEM characterizations.

These results will serve as a basis for a PhD thesis that will investigate the behaviour of these fuels under irradiation.

- Formation souhaitée :

Third year of general engineering school or Master 2 in physics

- Durée du stage :

5- 6 months

- Méthode/logiciel(s):

TEM Image analyses by AI, softwares TOPAS/EVA for XRD

- Mots clés :

MOX, irradiation defects, XRD, TEM

- Possibilité de thèse :

YES

- Contact :

SABATHIER Cathy/
FOUQUET-METIVIER Pauline

Catherine.sabathier@cea.fr

Caractérisation rhéologique des pâtes d'impression pour un procédé de fabrication additive de cermet UO_2 / Molybdène

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 procédés sont réalisées à l'aide d'une imprimante 3D prototype bi-matériau. L'impression de CERMET Alumine molybdène a déjà fait l'objet d'une thèse, travaux qui ont permis l'impression de CERMET mais le procédé reste à appliquer à la réalisation de combustibles.

Pendant le stage, les thèmes suivants seront développés :

- Prise en main d'un rhéomètre capillaire développé en collaboration avec l'IRCER à Limoges (Institut de Recherche Céramique).
- Caractérisations rhéologiques de formulations à l'aide du rhéomètre capillaire.
- Optimisations de formulations en UO_2
- Réalisation d'impressions selon différentes propositions de formulations
- 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

- Formation souhaitée :

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

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Programmation Pyton, logiciel d'impression Simplified 3D, cura

- Mots clés :

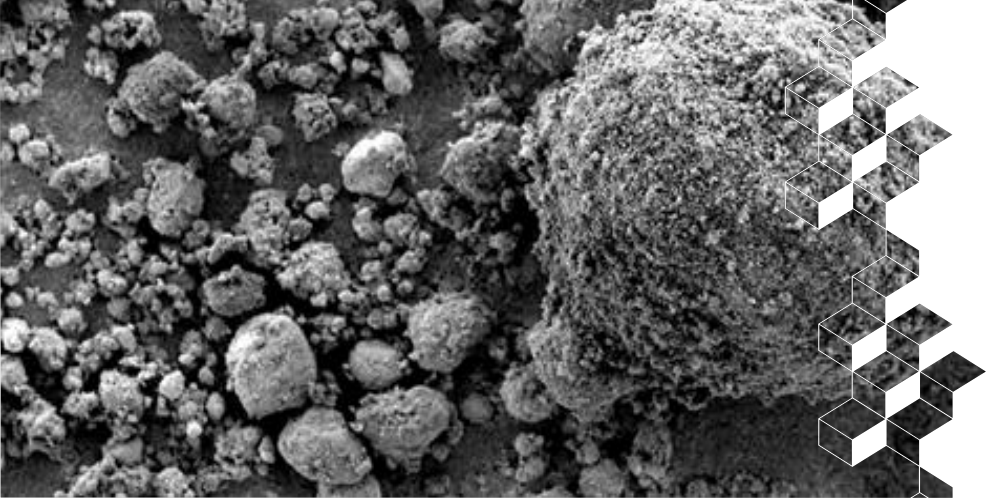
Fabrication additive, CERMET

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

FIQUET Olivier
Olivier.fiquet@cea.fr



Comparaison de protocoles pour la réalisation de mesures par granulométrie laser en voie liquide

DEC/SA3E/LCU

La granulométrie laser en voie liquide est une technique de mesure mise en œuvre au DEC/SA3E/LCU pour la caractérisation de poudres de dioxyde d'uranium UO_2. Ce stage vise à optimiser la méthodologie de mesure.

Le stage sera réalisé au sein du Laboratoire des Combustibles Uranium du CEA Cadarache. Ce laboratoire mène des activités de R&D dans le domaine de la fabrication des combustibles à base d'uranium. Il est ainsi amené à réaliser des caractérisations de poudres, notamment de poudres radioactives de dioxyde d'uranium UO_2.

Ce stage s'inscrit dans le cadre de l'optimisation de méthodes pour la mesure de distributions granulométriques par granulométrie laser en voie liquide. Le stage s'attachera en particulier à comparer l'effet de plusieurs surfactants, utilisés comme additifs pour les mesures.

Deux granulomètres pourront être utilisés successivement pour le stage. Le premier est situé en dehors de la zone contrôlée et permet de faire des mesures sur poudres inactives. Le second, situé dans l'ICPE Labo UO2, permet de faire des mesures sur poudres radioactives, de type poudres de dioxyde d'uranium UO_2. Le stagiaire sera formé à la manipulation de ce type de matières radioactives et il travaillera en interaction avec les techniciens et chercheurs du laboratoire.

- Formation souhaitée :

Bac+2 ou Bac+3

- Durée du stage :

>3 mois

- Méthode/logiciel(s):

granulométrie laser

- Mots clés :

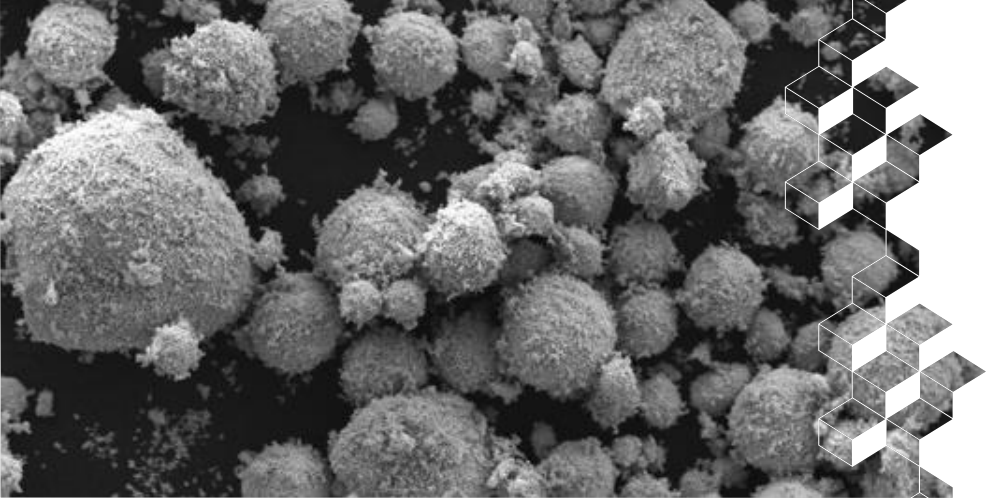
poudre, UO2, granulométrie

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

M. Henri et C. Ablitzer
mathieu.henri@cea.fr
carine.ablitzer@cea.fr



Etude de la ségrégation des poudres d'UO_2 sous vibrations

DEC/SA3E/LCU

Ce stage s'inscrit dans une étude globale qui a pour objectif de comprendre le comportement d'un milieu granulaire soumis à des vibrations et plus particulièrement de déterminer dans quelles conditions les constituants des poudres d'UO_2 peuvent se séparer lors d'un écoulement vibratoire.

Contexte et objectifs:

Les poudres d'oxyde d'uranium utilisées industriellement pour la fabrication du combustible des centrales nucléaires sont constituées d'agglomérats de tailles, de formes et de densités variées. Ces variations peuvent engendrer, au cours des opérations de manutention et de transport, une ségrégation des constituants de la poudre, entraînant des risques de dégradation de la qualité et de la productivité industrielle.

Une étude précédente a permis de développer un dispositif expérimental permettant de caractériser la propension à la ségrégation de mélanges de poudres inactives (alumine, sable) sous vibrations. L'objectif de ce stage est de continuer à améliorer le protocole actuel et d'étudier l'influence de certains paramètres du procédé (épaisseur du lit de poudre, amplitude des vibrations, …) sur des poudres modèles d'UO_2.

Etapes du stage:

- Prise en main du dispositif expérimental de ségrégation et de l'ensemble du protocole
- Essais de répétabilité de l'étude précédente
- Etablissement d'une grille expérimentale
- Fabrication de poudres modèles
- Mesure de la ségrégation de ces poudres modèles
- Analyse des résultats

En parallèle de ces actions, le/la stagiaire pourra proposer des modifications du dispositif et/ou du protocole de mesure.

Pour le candidat:

Ce stage permettra au candidat d'acquérir ou d'approfondir des connaissances sur le comportement des milieux granulaires ainsi que sur des procédés et techniques de caractérisations associées. Il se familiarisera également avec le travail en milieu nucléaire en laboratoire appliqué à une problématique à l'interface entre la recherche et l'industrie.

S'il le souhaite, le/la candidat(e) pourra également poursuivre le projet par une thèse qui comportera également une approche numérique pour modéliser les phénomènes observés.

Lieu:

Le stage se déroulera au sein de l'Institut de Recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone sur le site de Cadarache à 30min d'Aix-en-Provence.

- Formation souhaitée :

Bac +4 ou +5 en Génie des procédés, Génie mécanique ou Science des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Granulomètre laser, MEB, Python

- Mots clés :

Milieu granulaire, procédé, écoulement, ségrégation

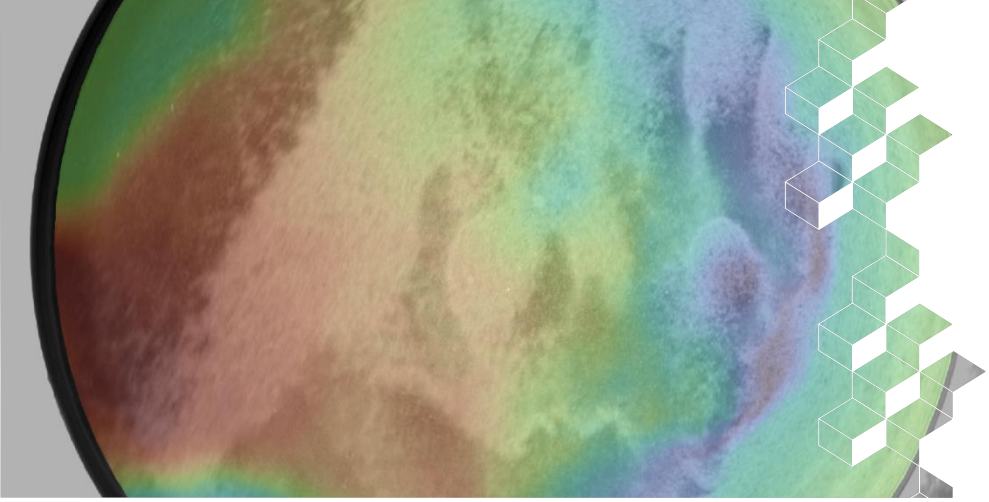
- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

Blanc Nicolas

nicolas.blanc@cea.fr



BRO-IA-GE : Prédire l'état du broyage avec l'instrumentation et un algorithme d'apprentissage

DEC/SA3E/LCU

Le broyage à boulets constitue une étape essentielle de la préparation des poudres céramiques, en particulier dans le domaine du nucléaire. Afin de mieux comprendre les mécanismes internes et de prédire l'évolution de la granulométrie, une plateforme instrumentée par imagerie rapide, capteurs acoustiques et vibratoires est disponible. Le stage aura pour objectif d'analyser ces données et de développer des algorithmes d'apprentissage capables de relier les signaux multi-capteurs aux régimes d'écoulement et à la fragmentation des poudres.

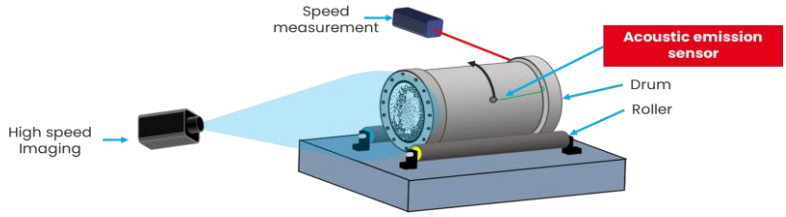


Fig. 1: Schéma du montage

Contexte et objectifs :

Le broyage à boulets est une étape clé dans la préparation de poudres céramiques, notamment pour la fabrication de combustibles nucléaires. Ce procédé met en jeu des régimes d'écoulement granulaires et des dynamiques de fragmentation difficiles à observer directement. Les approches traditionnelles, souvent empiriques, ne permettent pas de décrire avec précision les transitions de régime.

.Pour dépasser ces limites, le CEA développe une approche innovante combinant instrumentation multi-capteurs (imagerie rapide, émission acoustique) et algorithmes d'apprentissage. L'objectif est de relier les signaux mesurés en temps réel à l'évolution de la granulométrie afin de mieux comprendre les régimes d'écoulement, de prédire la taille des particules et, à terme, de contrôler le procédé de manière optimisée.

Étapes du stage :

•**Bibliographie et prise en main** :
Compréhension du contexte scientifique, état de l'art, familiarisation avec les données et capteurs.
•**Expérimentation** :
Réalisation de campagnes de mesures et enrichissement de la base de données multi-capteurs.
•**Analyse** :
Extraction et corrélation des indicateurs pertinents.
•**Algorithmes d'apprentissage** :
Mise en œuvre et test de modèles pour la prédiction et le suivi des régimes de broyage.
.

Localisation du stage :

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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 expérimental multi-capteurs appliqué à une problématique industrielle et scientifique de premier plan, à l'interface entre instrumentation, analyse de données et algorithmes d'apprentissage.

- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé mécanique et/ou matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, imagerie rapide, instrumentation, analyse des poudres

- Mots clés :

Poudre, Capteurs, Apprentissage, Broyage

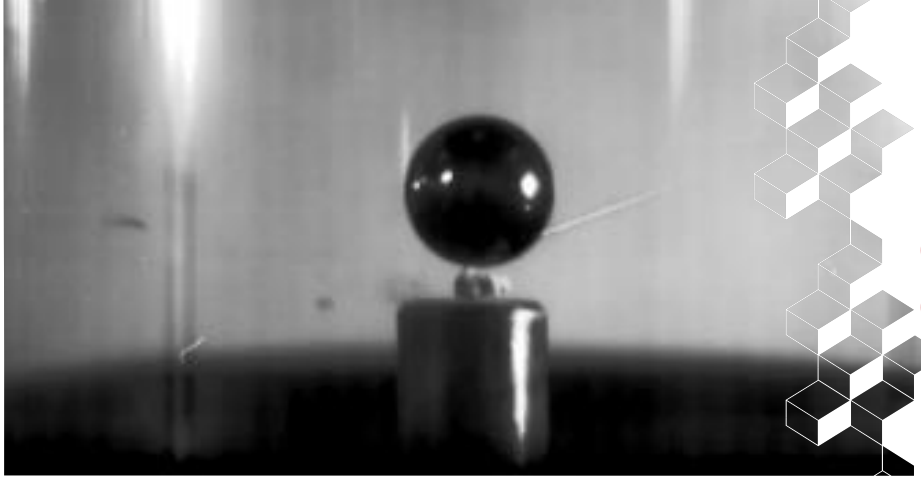
- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Hugo.durand@cea.fr

Christophe.roubaud@cea.fr



Etude du broyage de poudres par des mesures de compression dynamique de particules

DEC/SA3E/LCU

Ce stage s'inscrit dans une étude globale qui a pour objectif de prédire le comportement d'une poudre dans un broyeur à boulets, en couplant des approches expérimentales et numériques.

Plus précisément, le but du stage est de faire évoluer la conception d'un dispositif de compression dynamique permettant de caractériser les propriétés mécaniques de particules céramiques, à l'échelle de la mono-particule et du lit de poudre. Ces données alimenteront ensuite des études de modélisation par la méthode des éléments discrets (DEM), afin de simuler la fragmentation et le comportement des poudres.

Une analyse des mécanismes de fragmentation des particules ou agglomérats, décrits dans la littérature, devra permettre, dans un premier temps, de définir les conditions de sollicitations mécaniques intervenant lors du broyage. Cette phase conduira à identifier les paramètres à étudier expérimentalement pour mieux comprendre la fragmentation. En parallèle, des simulations numériques par la méthode des éléments discrets (DEM) seront mises en œuvre avec le code CEA Rockable afin de modéliser les interactions entre particules et les phénomènes de rupture. Ces simulations permettront d'explorer des configurations expérimentales, de mieux interpréter les résultats obtenus, et d'orienter la conception du dispositif de mesure.

Après expertise d'un dispositif expérimental instrumenté existant reprenant le concept de barres d'Hopkinson, une évolution de sa conception mécanique et de son instrumentation sera proposée pour déterminer les forces à rupture, étudier via une caméra rapide et analyse d'images l'impact de fragmentation, mesurer les fragments, etc…
A l'issue d'une étude de conception mécanique, une expression de besoin sera réalisée pour faire évoluer le dispositif de mesure ou en acheter un nouveau

- **Objectifs principaux :**

- Faire évoluer la conception mécanique d'un dispositif de compression dynamique pour tester des particules de poudre dans la gamme 250–2000 µm, avec instrumentation adaptée (jauges de déformation, caméra rapide, …)

- Mettre au point le dispositif expérimental,

- Réaliser une étude expérimentale de la fragmentation dynamique de poudres modèles (particules isolées et agglomérats)

- Intégrer une modélisation numérique par la méthode des éléments discrets avec le code CEA Rockable pour reproduire les résultats expérimentaux et mieux comprendre les mécanismes de fragmentation

- Évaluer l'influence des propriétés mécaniques des particules sur leur comportement en broyage, via des simulations DEM

- **Principales étapes :**

- Analyse bibliographique **:** techniques de fragmentation de particules et d'agglomérats, modèles de fragmentation, paramètres mécaniques influençant la rupture : seuils de contrainte, vitesse d'impact, énergie,…

- Étude expérimentale et conception du dispositif : expertise du dispositif existant (basé sur les barres d'Hopkinson), conception assistée par ordinateur (CAO) pour améliorer l'ergonomie, la précision, la robustesse, instrumentation (jauges de déformation, caméras rapides, analyse d'images pour mesurer la taille des fragments),

- Définition de l'expression de besoin : rédaction du cahier des charges fonctionnel, demande de devis auprès de fournisseurs, suivi de la fabrication et de l'intégration,

- Modélisation par la méthode des éléments discrets (DEM) :

  - Mise en place d'un modèle numérique représentant l'impact et la fragmentation des particules
  - Calibration des propriétés des particules à partir des essais

- Comparaison des résultats numériques avec les données expérimentales (force de rupture, distribution des fragments, énergie dissipée)

Analyse des mécanismes de fragmentation observés dans les simulations

A l'issue de ce travail, le/la stagiaire disposera de compétences dans le domaine de la caractérisation expérimentale de poudres et particules, de la modélisation numérique par la méthode des éléments discrets (DEM), de la CAO et conception mécanique d'un dispositif instrumenté, du traitement d'images et analyse de données de fragmentation et d'une connaissance approfondie des milieux granulaires et de leur comportement mécanique.

Formation souhaitée :

2ème / 3ème année d'école d'ingénieur spécialité matériaux et procédés

Durée du stage :

5/6 mois

Méthode/logiciel(s):

Python, traitement d'images et du signal

Mots clés :

Broyage, poudre, compression, dynamique, traitement signal

Possibilité de thèse :

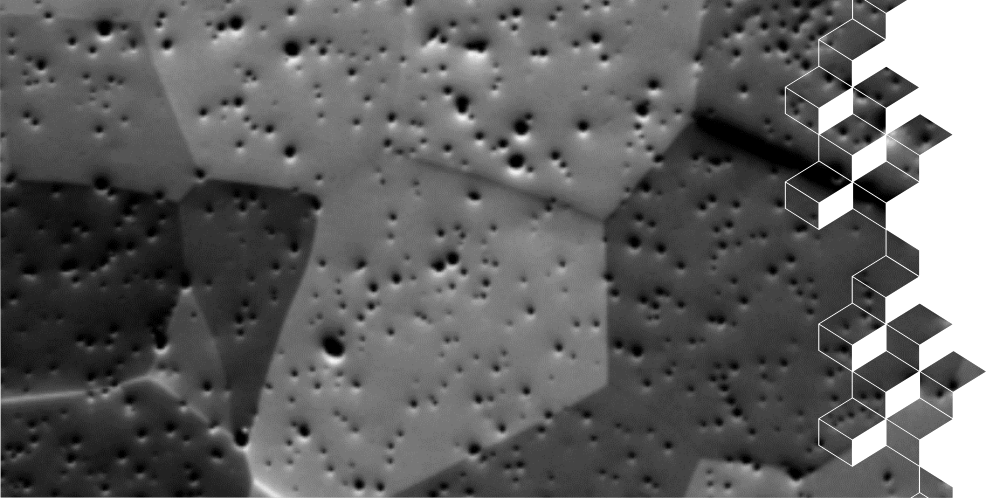
Non

Contact :

C. Roubaud / H, Durand

christophe.roubaud@cea.fr

hugo.durand@cea.fr



Effet du dopage par un oxyde métallique sur le frittage d'un combustible UO_2

DEC/SA3E/LCU

Ce stage, au sein du Laboratoire des Combustibles Uranium, vise à confirmer l'intérêt de certains dopants dans la conception de combustibles nucléaires innovants. Le cœur de ce travail s'articulera autour de l'étude de l'étape de frittage et de la caractérisation de pastilles d'UO_2 dopé par un oxyde métallique.

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 résister à des conditions extrêmes de température et de pression. L'une des problématiques est de limiter l'interaction chimique entre la pastille et la gaine, notamment la corrosion sous contrainte assistée par l'iode, un produit de fission du combustible relâché pendant les situations transitoires.

Ce stage contribuera au développement de combustibles nucléaires avancés, reposant sur le dopage de l'UO_2 par un oxyde métallique. La microstructure des pastilles d'UO_2 dopées peut présenter une taille de grains plus importante que le matériau standard, ce qui pourrait améliorer la rétention des gaz de fission. Un dopant bien choisi peut également limiter le caractère corrosif des produits de fission.

Objectifs du stage :

- Pilotage de la microstructure du matériau

Au cours de ce stage vous étudierez les mécanismes de densification et de grossissement des grains de l'UO_2 dopé, ainsi que l'influence des paramètres du frittage sur la microstructure. Ce travail pourra vous conduire à proposer des axes d'optimisation des conditions de fabrication.

- Construction d'un modèle de solubilité

Vous contribuerez également par vos résultats à bâtir un modèle de solubilité de l'oxyde d'intérêt dans l'UO_2, en interaction avec le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles.

Missions principales :

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

- Etude du frittage d'échantillons d'UO_2 dopés par dilatométrie, par ATD/TG

- Caractérisation des échantillons : en particulier par microscopie optique et électronique (EDX et EBSD).

- Analyse et Interprétation des résultats obtenus en lien avec les modélisateurs.

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

Durant ce stage, vous serez accueilli(e) au sein du Service d'Analyses, d'Elaboration, d'Expérimentations et d'Examens (SA3E) du Département d'Etude des Combustibles.

Vous acquerrez 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).

Il pourra être poursuivi par une thèse !

- Formation souhaitée :

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

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Dilatométrie, MEB, DRX, ATD/TG, Python

- Mots clés :

Matériaux nucléaires, céramiques, physico-chimie, caractérisation

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

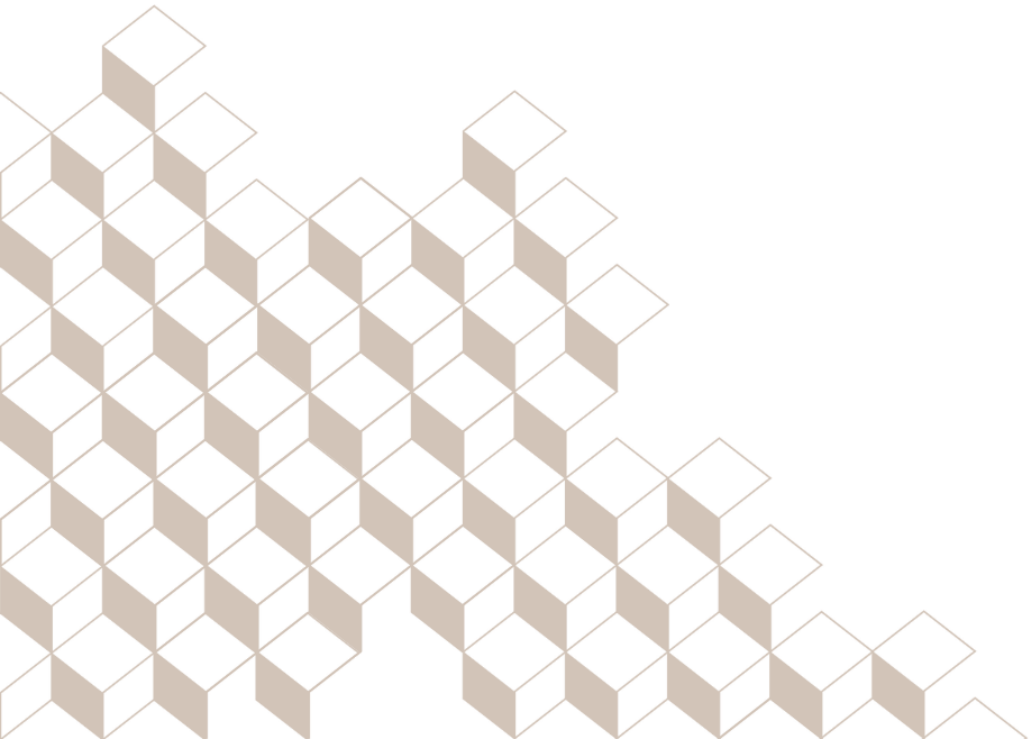
Moulin Julien

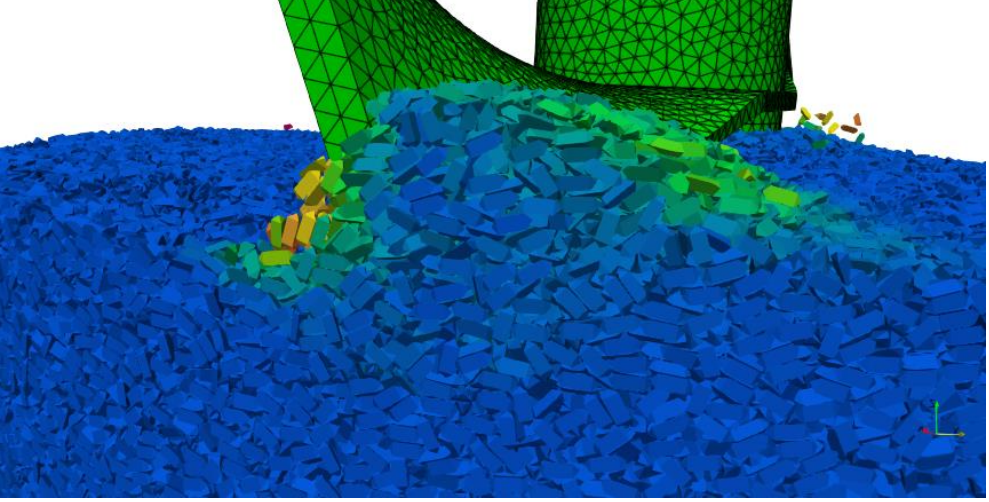
Julien.moulin@cea.fr

S E S C

Service d'études et de simulation du comportement des combustibles

Studies and Simulation of Fuel Behavior Unit





Modélisation et simulation à l'aide du code ExaDEM de dispositifs expérimentaux pour l'étude de milieux granulaires

DEC/SESC/LDOP & DEC/SA3E/LCU

Ce stage s'inscrit dans une étude globale dédiée à la modélisation et à la simulation des procédés de fabrication des combustibles nucléaires basés sur la métallurgie de poudres. En laboratoire, plusieurs dispositifs expérimentaux sont utilisés pour la préparation et l'étude du comportement des poudres. L'objectif principal de ce stage est de construire par CAO des modèles numériques de ces dispositifs afin de les utiliser par la suite dans des simulations numériques de milieux granulaires avec le code de calcul HPC opensource ExaDEM.

Contexte et objectifs :

L'étude des procédés de fabrication des combustibles nucléaires s'appuie sur deux composantes que sont la simulation numérique et l'expérimentation.

Coté expérimental, un ensemble de dispositifs est utilisé pour la préparation et l'étude du comportement des poudres nucléaires (notamment le dioxyde d'Uranium UO_2) : couloirs vibrants, rhéomètres, broyeurs, presses…

Du coté simulation numérique, Le CEA développe un code de Calcul Haute Performance (HPC) **ExaDEM** [1], basé sur la méthode des éléments discrets (Discrete Element Method - DEM), code essentiel pour la simulation prédictive des matériaux granulaires (voir Fig.1).

Dans le but de comparer les expériences aux simulations numériques, une étude CAO des différents dispositifs expérimentaux est nécessaire.

L'objectif du stage est de capitaliser et réaliser les CAO de ces différents dispositifs expérimentaux et d'effectuer une première mise en données représentative des expériences à l'aide du code ExaDEM.

Étapes du stage :

- Réaliser un inventaire des dispositifs expérimentaux d'intérêt (broyeurs, mélangeurs, rhéomètres …).
- Élaborer les fichiers STL à l'aide d'un logiciel de CAO (Blender ou équivalent).
- Prendre en main la méthode DEM et le code ExaDEM,
- Mettre en place des simulations et réaliser une première validation des résultats pour des cas test simples.

Lieu du stage :

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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.

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.

Fig. 1: Exemple de Simulation réalisée avec le code HPC ExaDEM

EXADEM

- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en CAO et/ou calcul scientifique

- Durée du stage :

5 ou 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Blender ou équivalent, ExaDEM

- Mots clés :

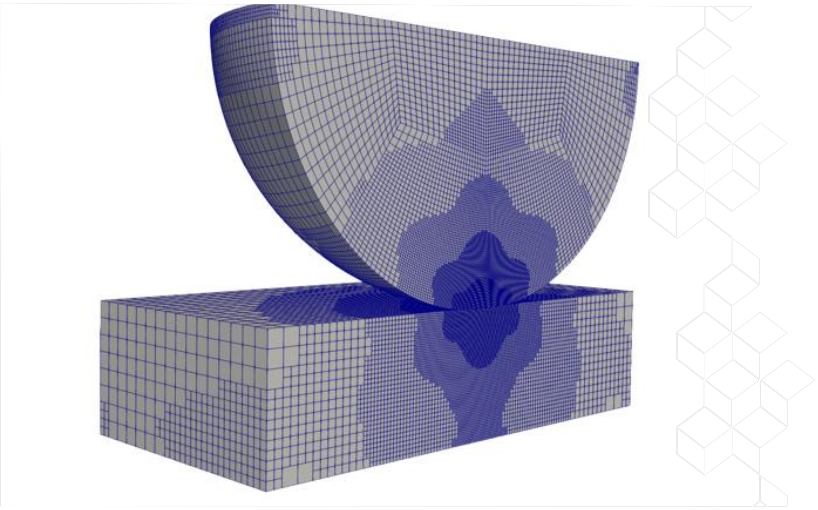
CAO, DEM, HPC

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

raphael.prat@cea.fr
lhassan.amarsid@cea.fr
vincent.topin@cea.fr



Développement et mise en œuvre de méthodes itératives efficaces pour la résolution du contact dans un contexte HPC

DEC/SESC/LDOP & DEC/SESC/LMCP

L'objectif du stage est de mettre en œuvre dans un solveur éléments finis HPC une nouvelle stratégie de résolution itérative du contact

Le stage se déroulera à L'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone du **CEA Cadarache**, situé à 30 minutes d'Aix-en-Provence, dans le sud-est de la France. Les travaux menés dans cet institut s'inscrivent dans la conception de solutions énergétiques bas carbone, et comprennent notamment des activités de R&D de pointe sur la simulation du comportement des combustibles nucléaires.

Dans ce cadre, le CEA développe la plateforme logicielle « PLEIADES », en partenariat avec des acteurs industriels et académiques, afin de simuler le comportement des combustibles des différentes filières de réacteurs nucléaires.

Dans ce contexte, la modélisation précise et performante du contact mécanique [1] entre les différentes composantes d'un crayon combustible (gaine et fragments de combustible), illustrée sur la Figure 1, représente un défi scientifique et numérique majeur, en particulier dans un contexte de calcul haute performance (HPC).

Récemment, une nouvelle stratégie de résolution du contact basée sur une formulation de point fixe accélérée a été proposée par les chercheurs d'IRESNE. Elle présente un certain nombre d'intérêts par rapport aux méthodes existantes dans la littérature, notamment son aspect algébrique compatible avec un solveur HPC.

Une première implémentation (démonstrateur) de cette stratégie a été réalisée au sein du solveur éléments finis Cast3M. Les résultats obtenus sont très prometteurs, tant en termes de temps de calcul (par rapport aux stratégies traditionnelles) que de robustesse et précision, avec une faible sensibilité aux paramètres clés des algorithmes, notamment grâce à la stratégie d'accélération «Crossed Secant» [2].

L'objectif du stage est maintenant de tester ces stratégies dans un solveur éléments finis HPC.

Étapes du stage :

- Prise en main du sujet : mécanique du contact, méthodes numériques itératives
- Choix et prise en main d'un solveur éléments finis HPC
- Implémentation des nouvelles méthodes itératives dans le solveur éléments finis HPC retenu
- Validation sur des cas tests académiques de référence (contact de Hertz, indentation), puis sur un cas issu de la modélisation du comportement du combustible, en considérant des contacts nœud-à-nœud et nœud-à-surface
- Comparaison avec des approches standards de résolution du contact compatibles HPC (pénalisation)

[1] P. Wriggers. Computational Contact Mechanics. *Springer Berlin Heidelberg*, 2006

[2] I. Ramière and T. Helfer. Iterative residual-based vector methods to accelerate fixed point iterations. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(9):2210–2226, 2015.

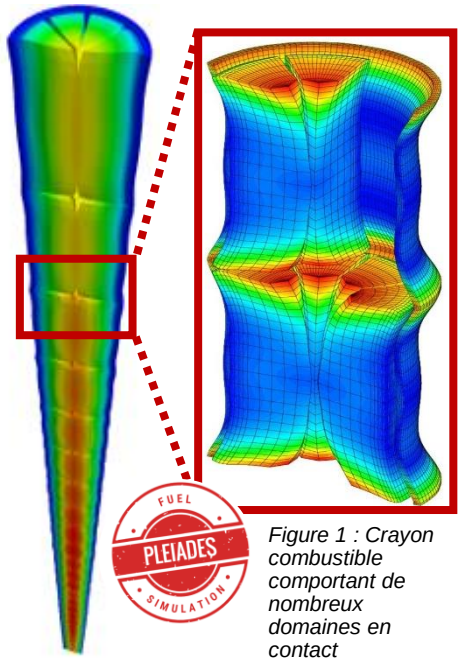


Figure 1 : Crayon combustible comportant de nombreux domaines en contact

- Formation souhaitée :

  École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées, mécanique numérique ou Calcul Haute Performance

- Durée du stage :

  6 mois

- Méthode/logiciel(s):

  Méthode des éléments finis, C++, Linux

- Mots clés :

  Mécanique de contact, éléments finis, HPC, méthodes numériques

- Possibilité de thèse :

  Oui

- Contact :

KOLIESNIKOVA Daria daria.koliesnikova@cea.fr
RAMIÈRE Isabelle isabelle.ramiere@cea.fr
CUTERI Francesca francesca.cuteri@cea.fr

Supercalculateur Topaze - CCRT

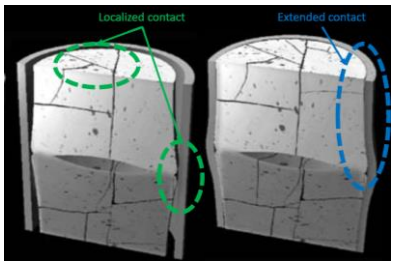


Illustration du contact dans un crayon de combustible nucléaire

Optimisation d'un solveur parallèle pour la modélisation du contact entre solides déformables

L'objectif de ce stage est d'optimiser la modélisation du contact au sein d'un solveur thermo-mécanique pour une exécution efficace sur supercalculateur

DEC/SESC/LDOP
DEC/SESC/LMCP

Le stage est proposé sur le site du CEA Cadarache à 30 minutes d'Aix en Provence dans le sud-est de la France. L'institut IRESNE mène 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.

Les matériaux intervenant dans les réacteurs nucléaires sont le siège de nombreux phénomènes physiques complexes et couplés lors de leur utilisation. Pour simuler le comportement des combustibles nucléaires, la modélisation des interactions thermiques et mécaniques lors d'un contact entre solides est primordiale (contacts entre fragments de combustible et avec la gaine qui entoure le combustible).

Bien que le sujet du contact soit ancien et abordé par de nombreux travaux de recherche, il y a peu de méthodes disponibles et efficaces pour modéliser correctement le contact de solides déformables sur des maillages de grande taille et sur calculateurs hautes-performances.

La méthode du troisième corps est une formulation implicite utilisée en mécanique des contacts. Les corps en contact sont intégrés dans un milieu (nommé troisième corps), qui devient de plus en plus rigide lors d'une compression. Bien qu'approximative, la méthode du troisième corps possède de bonnes propriétés mathématiques et numériques qui la rendent attractive vis-à-vis d'autres méthodes de modélisation du contact plus anciennes.

L'objectif du stage est de transformer un code séquentiel mettant en œuvre la modélisation du contact par la méthode du troisième corps avec le solveur éléments finis MANTA, vers une version parallèle. De plus, différents solveurs linéaires creux parallèles seront investigués (typiquement ceux disponibles dans la bibliothèque PETSc ou MUMPS). En effet les solveurs directs et les solveurs itératifs possèdent des propriétés et comportements différents lorsqu'on les emploie sur machine parallèle. Des benchmarks sur supercalculateur permettront d'évaluer si les solveurs itératifs (combinés avec des préconditionneurs adaptés), sont des solutions viables pour résoudre les systèmes linéaires issus de la méthode du troisième corps.

Un autre but sera d'étudier la performance des simulations sur supercalculateur (étude de scalabilité).

Si la durée du stage le permet, une implémentation sera réalisée avec le solveur éléments finis MFEM-MGIS. Des benchmarks seront engagés pour comparer MANTA versus MFEM-MGIS.

- **Formation souhaitée :**

École d'ingénieur ou Master 2 spécialisé en informatique parallèle ou calcul scientifique.

- **Durée du stage :**

5 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

C++, Gmsh, Python
MANTA, MFEM-MGIS.

- **Mots clés :**

HPC, Elements Finis, Simulation, Contact, Thermomécanique

- **Possibilité de thèse :**

Oui

- **Contact :**

LATU Guillaume guillaume.latu@cea.fr
HELFER Thomas thomas.helfer@cea.fr
CUTERI Francesca francesca.cuteri@cea.fr

Prototypage de la simulation du pressage par une méthode sans maillage

DEC/SESC/LDOP

Le pressage, largement utilisé dans l'industrie (pharmaceutique, agroalimentaire…), est une étape qui consiste à transférer la poudre (sous forme de granules) dans des moules de presse permettant d'obtenir après compactage des comprimés, pastilles, plaques… Ce stage a pour objectif de mettre en place un prototype de simulation du pressage par une méthode sans maillage de type MPM (Material Point Method).

Contexte

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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.

Ce stage s'inscrit dans un projet dédié à la modélisation multi-échelle du procédé de pressage de poudres. Les outils de calcul scientifique développés actuellement pour modéliser ce procédé sont basés sur la méthode des éléments finis (FEM) à l'échelle de la pastille et sur la méthode des éléments discrets (DEM, Discrete Element Method) à l'échelle granulaire.

Afin d'envisager un passage de l'échelle granulaire à l'échelle de la pastille, des méthodes de simulation alternatives doivent être considérées, comme la Méthode des Points Matériels (MPM, Material Point Method). Cette technique permet la résolution du problème mécanique à une échelle intermédiaire (mésoscopique), et offre une grande flexibilité pour traiter des problèmes de grandes transformations tout en respectant les équations de la mécanique des milieux continus. De plus, ce type de méthode permet de réduire les coûts de calcul en comparaison avec la méthode DEM. Néanmoins, comme toute méthode en mécanique des milieux continus, une loi de comportement est nécessaire pour que le problème de mécanique soit bien posé. Or, suivant la sollicitation, le milieu granulaire peut se comporter comme un solide, un liquide ou un gaz. Le choix du modèle de comportement devient alors primordial afin de décrire au mieux la densification des poudres pendant le pressage.

Objectifs

Ce stage a pour objectif de mettre en place un prototype de simulation du pressage basé sur la méthode MPM et d'explorer son applicabilité à ce procédé. Une loi de comportement mécanique adaptée à l'étude de la déformation des milieux granulaires devra être mise en place. Le prototype pourra être validé sur des cas tests de la littérature et comparé aux résultats de simulations DEM.

Étapes du stage

1. Etude bibliographique des méthodes de simulation et des lois de comportement pour un milieu granulaire soumis à une compaction, en explorant la méthode MPM, ainsi que les lois de comportement de type $\mu(I)$ ou Drucker-Prager.
2. Implémentation de la méthode numérique et de la loi de comportement sélectionnée.
3. Vérification et validation du prototype.

Collaborations

Ce stage sera réalisé en collaboration avec le laboratoire 3SR de Grenoble (Unité Mixte de Recherche associant l'Université Grenoble Alpes, le CNRS et Grenoble INP – UGA)

- 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):

Mécanique des milieux continus, MPM, DEM, SPH, C++, Python.

- Mots clés :

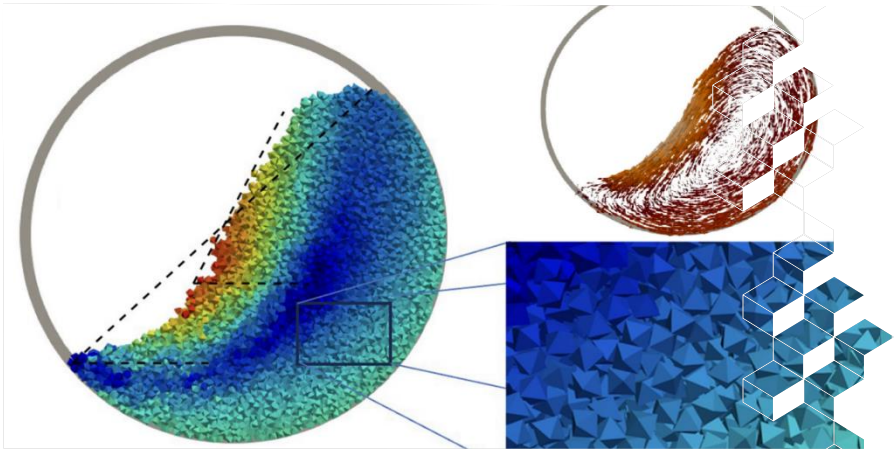
Milieux granulaires, modélisation mécanique, simulation numérique, lois de comportement.

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

Lhassan.amarsid@cea.fr
vincent.topin@cea.fr
vincent.richefeu@univ-grenoble-alpes.fr



Écoulement granulaire dans un tambour tournant : Comparaison Simulations vs expériences

DEC/SESC/LDOP & DEC/SA3E/LCU

Les écoulements granulaires dans un tambour tournant sont au cœur de nombreux procédés industriels, notamment lors de la préparation des poudres utilisées pour la fabrication des combustibles nucléaires. Des données expérimentales de référence sont déjà disponibles. Le stage aura pour objectif de développer un jumeau numérique de ces écoulements à l'aide de la méthode des éléments discrets (DEM) mise en œuvre dans le code haute performance ExaDEM, puis de comparer les prédictions aux résultats expérimentaux.

Contexte et objectifs :

L'étude des procédés de fabrication des combustibles nucléaires s'appuie sur deux approches complémentaires : la simulation numérique et l'expérimentation.

Côté expérimental, des études antérieures ont permis d'acquérir des données sur les écoulements granulaires dans un broyeur à boulets, voir la figure 1.

Côté numérique, le CEA développe **ExaDEM** [1], un code de calcul haute performance (HPC) basé sur la *Discrete Element Method* (DEM), particulièrement adaptée à la modélisation des matériaux granulaires complexes.

L'objectif du stage est de mettre en œuvre des simulations numériques à l'aide d'ExaDEM afin de construire un **jumeau numérique de l'empilement de galets** dans le tambour et de confronter les résultats aux données expérimentales disponibles.

Étapes du stage :

• Prise en main de la méthode DEM et de l'outil ExaDEM.

• Analyse et intégration des données expérimentales nécessaires à la modélisation.

• Réalisation des simulations numériques avec ExaDEM.

• Analyse des résultats, comparaison avec les données expérimentales.

• Utilisation du modèle pour la prédiction de l'empilement de galets.

Lieu du stage :

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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.

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.

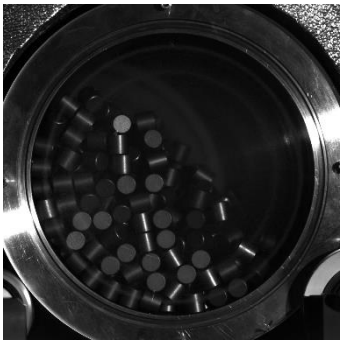


Fig. 1: Exemple de broyeur à boulets

EXADEM

- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé mécanique et/ou calculs scientifiques

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

ExaDEM

- Mots clés :

DEM, HPC

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

Lhassan.amarsid@cea.fr

Christophe.roubaud@cea.fr

Hugo.durand@cea.fr

Vue du réacteur expérimental RJH

Mise en place d'une simulation thermomécanique d'un assemblage combustible de réacteur nucléaire de recherche sur supercalculateurs HPC

DEC/SESC/LDOP

L'objectif de ce stage est d'optimiser des simulations thermomécaniques d'assemblages de combustible sur supercalculateurs HPC

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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.

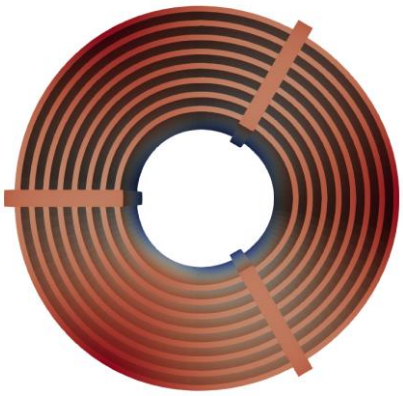
Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un projet de réacteur nucléaire de recherche porté par le CEA et construit sur le centre de Cadarache, consacré à la recherche sur les matériaux et les combustibles pour l'industrie électronucléaire et à la production de radio-isotopes pour la médecine nucléaire.

La plateforme logicielle « PLEIADES » est développée au CEA en collaboration avec différents partenaires industriels et académiques pour simuler le comportement des combustibles des différentes filières de réacteurs nucléaires. Le code de calcul PLEIADES/MAIA dédié aux réacteurs de recherche permet de simuler le comportement en réacteur des plaques et des assemblages combustibles.

L'un des enjeux pour le CEA est de reproduire numériquement le comportement multiphysique en réacteur de la totalité d'un assemblage combustible type RJH.

Une limitation actuelle de l'application MAIA pour réaliser un grand nombre de simulations provient du solveur thermomécanique utilisé. La solution retenue est l'utilisation d'un solveur éléments finis adapté au Calcul Haute Performance (HPC).

L'objectif du stage est d'optimiser les performances des simulations thermomécaniques d'un assemblage combustible complet d'un réacteur type RJH dans la version HPC de la plateforme PLEIADES en cours de développement au CEA, puis de lancer ces simulations sur les supercalculateurs du CEA. Une attention particulière sera portée sur les aspects solveurs et préconditionneurs en utilisant la bibliothèque PETSC, ainsi que sur la décomposition de domaines et l'équilibrage de charge de calcul entre les nœuds du supercalculateur.



Simulation thermomécanique d'un assemblage combustible type RJH

- **Formation souhaitée :**

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées, Calcul scientifique ou Calcul Haute Performance

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Méthode des éléments finis, plateforme PLEIADES, MPI, OpenMP

- **Mots clés :**

Thermomécanique, éléments finis, HPC, PLEIADES

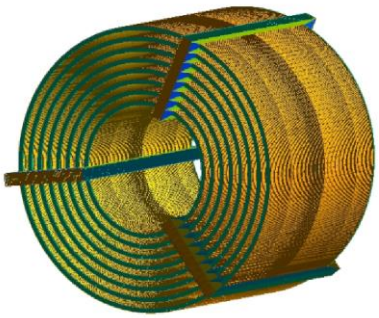
- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

Fauque Jules
jules.fauque@cea.fr
Prat Raphaël
raphael.prat@cea.fr

Supercalculateur Topaze - CCRT



Maillage hexaédrique d'un assemblage de combustible type RJH

Modélisation HPC d'un assemblage combustible type RJH et benchmark

DEC/SESC/LDOP

L'objectif de ce stage est d'améliorer la modélisation d'éléments combustible de type RJH et de réaliser des benchmarks sur supercalculateurs

Le stage est proposé sur le site du CEA Cadarache à 30 minutes d'Aix en Provence dans le sud-est de la France. L'institut IRESNE mène 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.

Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur expérimental en cours de construction sur le site du CEA Cadarache. Il permettra de tester le comportement de matériaux et de combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et futurs. Il permettra également de produire des radioéléments à usages médical et industriel.

La plateforme numérique « PLEIADES » est développée au CEA en collaboration avec EDF et Framatome pour simuler le comportement des combustibles de différentes filières de réacteurs nucléaires. Le code de calcul PLEIADES/MAIA dédié aux réacteurs de recherche, comme le RJH, permet de simuler des plaques de combustible en 3 dimensions.

L'objectif du stage est la construction d'une simulation HPC d'un assemblage combustible de type RJH. Pour ce faire, une modélisation thermo-mécanique sera mise en place en utilisant un solveur éléments finis HPC (MANTA) déjà employé pour d'autres simulations. De plus, le gonflement du combustible dû aux produits de fission solides et gazeux est un phénomène important. Il sera décrit par un modèle simplifié dans un premier temps. D'autre part, une condition aux limites de type isolant thermique devra être mis en place. L'utilisation de calculateurs parallèles permettra de prendre en charge une représentation avec un maillage fin des éléments combustibles.

Le stage se concentrera sur le développement de la modélisation 3D, et se déroulera en plusieurs étapes :

- Dans un premier temps, le stage consistera à réaliser une modélisation thermo-mécanique et un maillage fin des éléments tels que le gainage, l'âme combustible et les raidisseurs.
- Ensuite, il s'agira de contribuer à ajouter un modèle simple de gonflement gazeux et une condition aux limites thermique.
- Finalement, on étudiera les performances des simulations sur supercalculateur et on comparera ces dernières au logiciel de référence MAIA utilisé pour les études de sûreté.

- **Formation souhaitée :**

École d'ingénieur ou Master 2 spécialisé en informatique parallèle ou calcul scientifique.

- **Durée du stage :**

5 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

C++, Gmsh, MANTA, Python

- **Mots clés :**

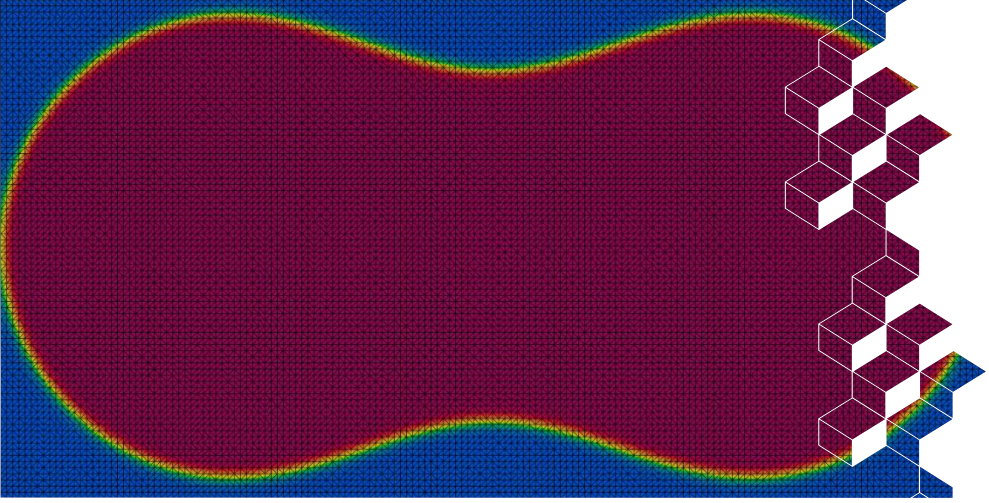
HPC, Simulation,Modélisation Thermomécanique

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

MAROIS Gentien gentien.marois@cea.fr
FAUQUE Jules jules.fauque@cea.fr
LATU Guillaume guillaume.latu@cea.fr



Parallélisation hybride MPI + GPU du code de champ de phase SLOTH

DEC/SESC/LDOP

Ce stage s'inscrit dans une volonté de montée en performance des outils de calcul pour la simulation des combustibles nucléaires sur les dernières générations de supercalculateurs dotés de cartes graphiques (GPU)

Les méthodes de champ de phase constituent un outil de modélisation flexible et performant pour décrire l'évolution spatio-temporelle de systèmes physiques complexes soumis à de fortes hétérogénéités (transitions de phase, coalescence, fissuration, etc.). Couramment utilisées en science des matériaux, elles sont mises en œuvre dans les outils de calcul scientifique de la plateforme logicielle PLEIADES, dédiée à la simulation du comportement des combustibles nucléaires et développée par le CEA avec différents partenaires industriels tels que EDF ou Framatome.

Les équipes du CEA ont développé un solveur champ de phase, nommé **PLEIADES/SLOTH**, destiné à l'étude du comportement du combustible à différentes échelles de description, depuis les conditions nominales de fonctionnement jusqu'à des situations extrêmes en termes de température et de composition des matériaux. À noter que SLOTH s'appuie sur la bibliothèque éléments finis **MFEM**, développée par le *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL).

Depuis plusieurs décennies, le CEA investit régulièrement dans de nouveaux supercalculateurs afin de suivre les évolutions matérielles. Depuis quelques années, ces machines sont massivement accélérées par des cartes graphiques, ce qui a nécessité une adaptation des codes de calcul ainsi qu'une évolution partielle de la pile logicielle. **SLOTH** s'inscrit dans cette refonte complète du module champ de phase basé sur MFEM et propose déjà de nombreuses fonctionnalités physiques, ainsi qu'une parallélisation en mémoire distribuée (MPI) testée sur plus de **32 000 cœurs de calcul**.

Le stage se déroulera en trois étapes :

– Prise en main du code **SLOTH** et d'exemples « standalone » de **MFEM**, intégrant déjà une parallélisation GPU. Cette étape inclut le profilage des performances à l'aide des outils Nvidia (*nsight-compute*, *nsight-systems*) ainsi que l'approche *roofline*.

– Mise en place d'un démonstrateur de **SLOTH** sur GPU, avec une attention particulière portée aux structures de données, et validation des performances par comparaison avec les résultats obtenus sur CPU.

– Déploiement de la parallélisation hybride **MPI + GPU** et validation sur un cas d'intérêt à très grande échelle.

- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en Mathématiques appliquées ou Calcul scientifique ou Calcul Haute Performance

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

SLOTH, MFEM

- Mots clés :

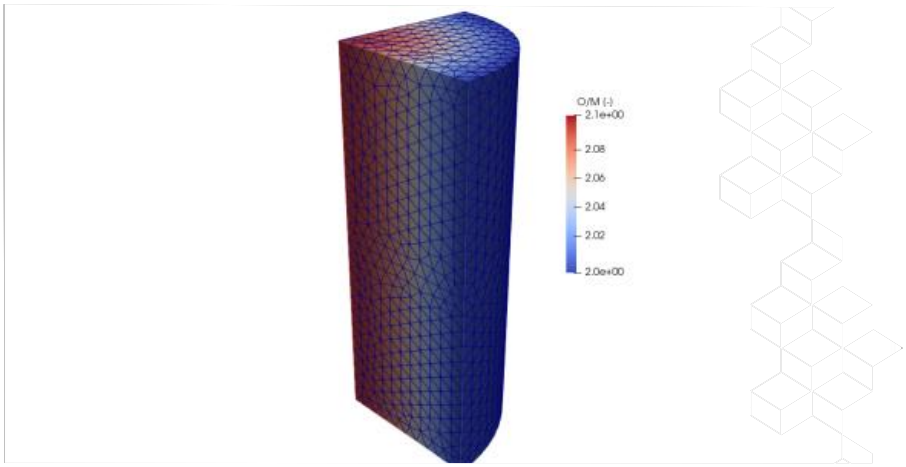
HPC, GPU, CUDA, MPI, Champ de phase, élément finis

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

raphael.prat@cea.fr
clement.introini@cea.fr



Vue en coupe d'une céramique de combustible nucléaire

Modélisation thermomécanique du frittage : lien pressage-frittage

DEC/SESC/LDOP

Ce stage a pour but d'étudier l'impact des propriétés microstructurales initiales de la pastille sur son comportement thermomécanique lors du frittage.

Le travail de stage pourra se poursuivre par une thèse sur la modélisation thermo-chemo-mécanique du frittage.

Le frittage des matériaux céramiques est une étape clé dans nombre de processus industriels. C'est également le cas pour les combustibles utilisés dans les centrales nucléaires électrogènes. Les caractéristiques microstructurales du combustible et son comportement en réacteur dépendent de cette étape.

L'étape de frittage des combustibles consiste en un traitement thermique en phase solide sous pression partielle contrôlée d'oxygène permettant de consolider et densifier le matériau, et de faire grossir les grains de la céramique. La taille de grain et la densification évoluent suivant les caractéristiques thermochimiques imposées par le four de frittage. Si le compact (poudre comprimée par pressage avant le frittage) admet de fortes hétérogénéités de densité, une différence de densification dans la pastille peut avoir lieu entraînant un retrait différentiel et potentiellement l'apparition de défauts (fissures et éclats).

Le but du stage est d'étudier, via des simulations numériques, l'impact du pressage sur le comportement thermomécanique de la pastille lors du frittage.

Pour ce faire, le stagiaire commencera par prendre en main les simulations de densification sur le code de calcul Licos de la plateforme logicielle « PLEIADES » [3]. Le modèle de densification repose sur une modélisation thermomécanique en grandes transformations du frittage. La loi de comportement utilisée est une loi viscoplastique poreuse dont les paramètres évoluent avec la densification [4]. La prise en main du modèle s'effectuera par la modélisation du frittage d'une pastille de combustible nucléaire ainsi que par l'étude de l'impact d'une densité hétérogènes du compact sur le comportement au frittage. Par la suite, il sera mis en place un chainage avec la modélisation élastoplastique poreuse du pressage [5] afin d'étudier l'impact des contraintes résiduelles. Suivant l'avancement du stage, il pourrait être étudié le couplage entre le modèle thermomécanique et un modèle de transport chimique afin de prendre en compte l'impact de l'atmosphère sur la cinétique de densification. La mise en place d'un modèle thermo-chemo-mécanique sera le cœur du sujet de la thèse poursuivant ces travaux de stage.

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), 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.

Le candidat devra présenter un goût marqué pour les simulations numériques, la mécanique et les approches multiphysiques. Il bénéficiera des expertises pluridisciplinaires essentielles pour sa formation et dans la mise en place des simulations.

Une poursuite en thèse sur la même thématique est envisageable.

Références

[1] S. Martin, « Contribution à la modélisation du frittage en phase solide », Thèse UTC, https://www.theses.fr/ 2014
[2] S. Bernaud, I. Ramière, G. Latu, B. Michel, «PLEIADES: A numerical framework dedicated to the multiphysics and multiscale nuclear fuel behavior simulation », Annals of Nuclear Energy, 205, 110577, 2024.
[3] T. Helfer, S. Bejaoui et B. Michel, « Licos, a fuel performance code for innovative fuel elements or experimental devices design». Nuclear Engineering and Design, 294:117–136, 2015.
[4] C. Manière, T. Grippi, and S. Marinel, « Estimate microstructure development from sintering shrinkage : A kinetic field approach ». Materials Today Communications, 31 :103269. (2022).
[5] J.-Ph. Bayle, V. Reynaud, F. Gobin, C. Brenneis, E. Tronche, C. Ferry and V. Royet.. «Modelling of powder die compaction for press cycle optimization». EPJ N - Nuclear Sciences & Technologies, EDP Sciences, 2, 25, 2016.

- **Formation souhaitée :**

École d'ingénieur ou Master 2 en mécanique non linéaire du solide et des matériaux ou physique des matériaux.

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Méthode des éléments finis, plateforme PLEIADES, CAST3M, LICOS, MFront

- **Mots clés :**

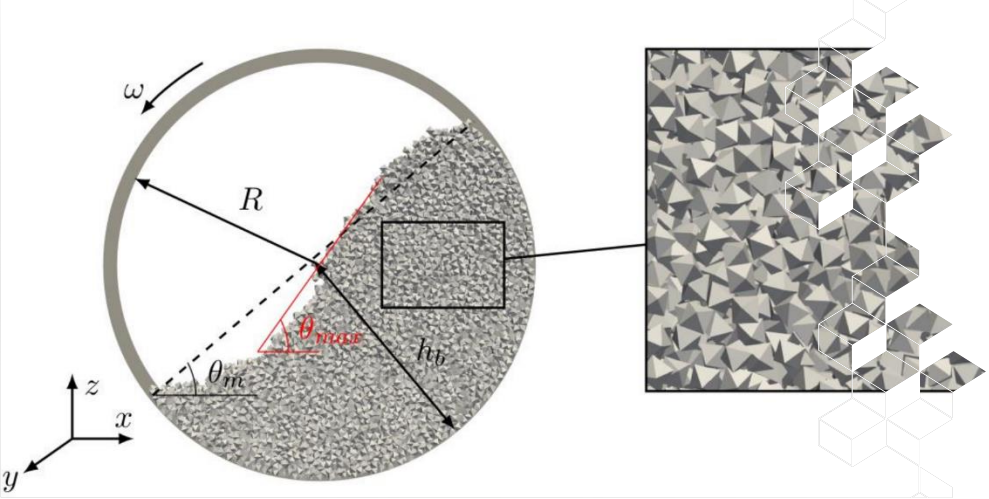
Frittage, thermomécanique, viscoplasticité, éléments finis

- **Possibilité de thèse :**

oui

- **Contact :**

Socié Adrien
adrien.socie@cea.fr
Léchelle Jacques
jacques.lechelle@cea.fr



Etude numérique par méthode DEM de l'effet de taille des particules sur les écoulements granulaires dans un tambour tournant

DEC/SESC/LDOP

Les écoulements granulaires dans un tambour tournant interviennent dans divers procédés industriels (pharmaceutique, agroalimentaire…), et notamment durant les étapes de préparation de poudres pour les procédés de fabrication des combustibles nucléaires. De précédents travaux ont établi un facteur d'échelle faisant intervenir plusieurs paramètres de contrôle dont la taille des particules. Le but de ce stage est d'étendre l'étude à des tailles de particules plus petites.

Contexte et objectifs :

Ce stage s'inscrit dans le cadre des études numériques des écoulements granulaires dans un tambour tournant.

Des travaux précédents ont permis d'établir un facteur d'échelle faisant intervenir plusieurs paramètres de contrôle dont la taille des particules et le taux de remplissage du tambour [1].

L'objectif du stage est de compléter cette étude en utilisant des tailles de particules plus petites (tout en gardant un même taux de remplissage). Cela engendre un nombre conséquent de particules (de l'ordre de plusieurs millions de particules) ce qui nécessite l'utilisation d'un outils de calcul haute performance (HPC).

Les simulations numériques seront réalisées à l'aide du code ExaDEM [2] qui est un outil HPC basé sur la méthode des éléments discrets (voir Fig. 1).

Étapes du stage :

- Prise en main de la méthode DEM et du code ExaDEM.
- Appropriation de la phénoménologie et des conclusions décrites dans l'étude précédente [1].
- Réalisation des simulations numériques nécessaires à l'étude à l'aide du code ExaDEM.
- Analyse des résultats. Vérification du facteur d'échelle établi dans [1].

Lieu du stage :

Le stage est proposé au sein de l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie 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 des combustibles nucléaires. Ces activités associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Référence :

[1] D-C Vu et al (2024), Rheology and scaling behavior of polyhedral particle flows in rotating drums,Powder Technology,Volume 434.

[2] 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.

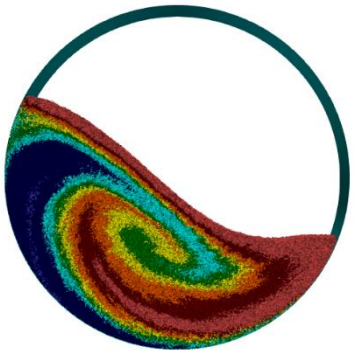


Fig. 1: Exemple de simulation d'un tambour tournant avec 1 million d'octaèdres avec ExaDEM

EXADEM

- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé Mécanique et/ou calculs scientifique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

ExaDEM

- Mots clés :

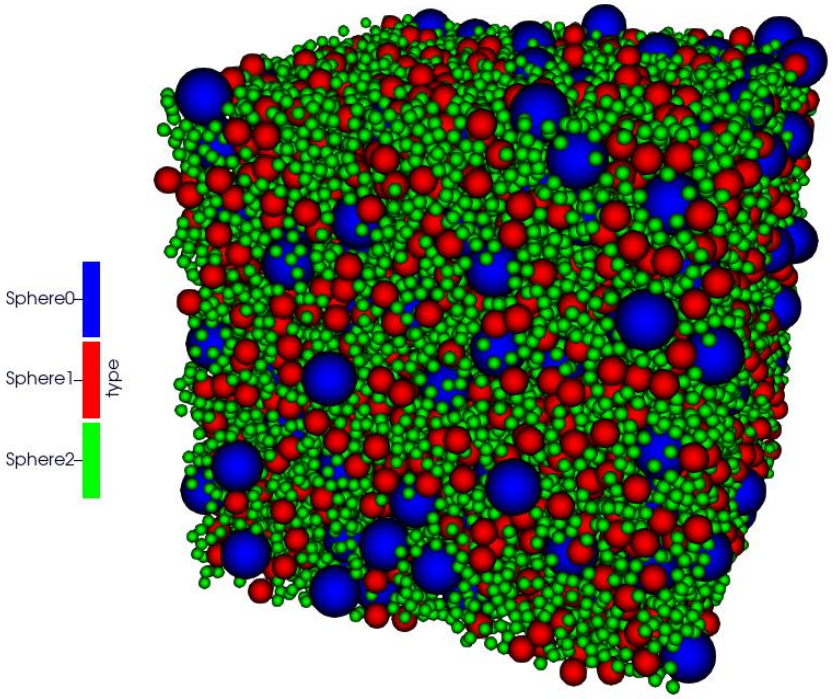
DEM, HPC

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

vincent.topin@cea.fr
lhassan.amarsid@cea.fr
raphael.prat@cea.fr



Génération automatique HPC de microstructures granulaires

DEC/SES/LDOP et DEC/SESC/LMCP

Ce stage a pour objectif de mettre en place la génération aléatoire de formes complexes suivant l'algorithme Random Sequential Addition (RSA) dans un contexte de calcul haute performance.

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), 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.

Le matériau combustible est un matériau complexe, fortement hétérogène et présentant une microstructure dont la représentation fine est cruciale pour des simulations fidèles. Un des enjeux de la simulation numérique consiste à pouvoir générer des échantillons numériques de ce matériau. C'est le rôle de l'outil opensource Mérope [2] développé à IRESNE. Dans le cas de matériaux granulaires avec un très grand nombre de particules, il devient nécessaire de recourir au HPC ; l'outil RSA-MPI [3, 4] a été développé à cette fin. Il est toutefois limité au placement de sphères.

L'objectif du stage est de généraliser les fonctionnalités de placement de RSA-MPI à des formes plus variées (dont polyèdres et ellipsoïdes, Figure 1), tout en maintenant une bonne performance HPC. Il est envisagé de s'appuyer sur la plateforme ExaNBody décrite ci-dessous.

La plateforme ExaNBody [1] développée au CEA est dédiée à la mise en place de simulation à N-Corps dans un contexte de Calcul Haute Performance (CPU/GPU). Elle est notamment utilisée par le code de dynamique moléculaire exaSTAMP et par le code pour l'étude des milieux granulaires exaDEM (Discret Element Method). Cette plateforme HPC a récemment été étendue pour intégrer d'autres méthodes que les méthodes à N-Corps et notamment l'algorithme RSA.

Le candidat retenu possédera un solide bagage en calcul scientifique, avec une appétence pour le calcul HPC.

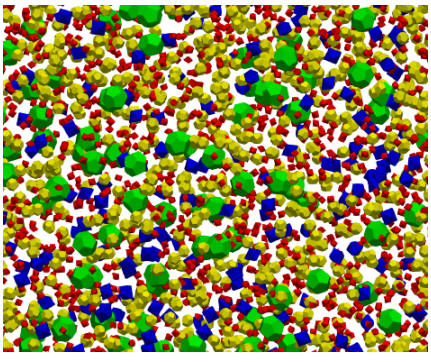


Figure 1 : Génération d'un ensemble de polyèdres

- **Formation souhaitée :**

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquée ou, Calcul scientifique

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

C++, MEROPE, RSA_MPI, ExaNBody

- **Mots clés :**

RSA

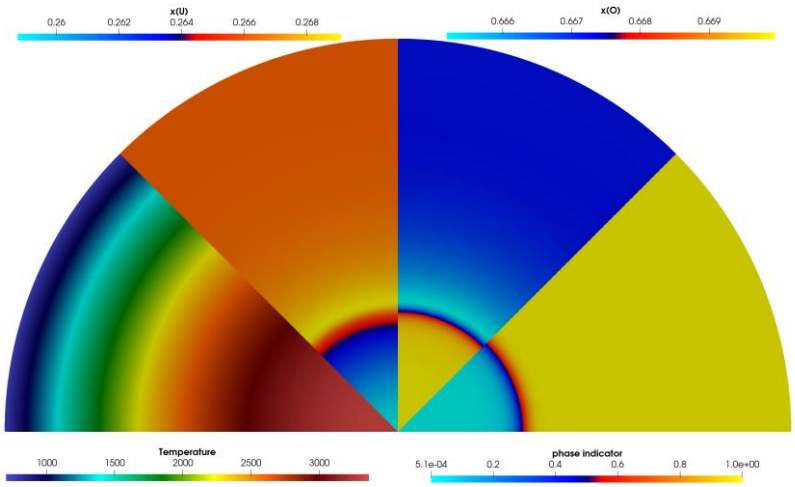
- **Possibilité de thèse :**

Oui

- **Contact :**

PRAT Raphaël & JOSIEN Marc
raphael.prat@cea.fr
marc.josien@cea.fr

{1] T. Carrard et al (2023, August). ExaNBody: A HPC framework for n-body applications. In *European Conference on Parallel Processing* (pp. 342-354).
[2] https://github.com/MarcJos/Merope
[3] https://github.com/MarcJos/RSA_MPI
[4] M. Josien and R. Prat, Parallel and bias-free RSA algorithm for maximal Poisson-sphere sampling, *Computer Physics Communications*



Jumeau numérique d'une expérience de chauffage laser sur un combustible nucléaire d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium

Ce stage s'inscrit dans une volonté de développement d'un jumeau numérique permettant de simuler efficacement et précisément une expérience de chauffage laser visant à déterminer les propriétés thermodynamiques des combustibles nucléaires $(U, Pu)O_{2\pm x}$**.**

Ce stage s'inscrit dans un projet du CEA visant à déterminer les propriétés thermodynamiques des combustibles oxydes mixtes d'uranium et de plutonium $(U, Pu)O_{2\pm x}$, en particulier à l'aide d'expériences de chauffage laser à haute température (T>3000 K). Ces expériences permettent notamment d'étudier la transition solide/liquide du combustible nucléaire avec la mesure du solidus et du liquidus [1], deux propriétés d'intérêt majeur pour la conception d'un combustible assurant le respect des critères de sûreté concernant la marge à la fusion.

La complexité de réalisation de ces expériences en réacteur/sous irradiation motive les équipes du CEA à développer un jumeau numérique capable de simuler le comportement du combustible dans les conditions extrêmes de température et de composition induites par le chauffage laser. Cette maquette doit prendre en compte les mécanismes prépondérants de diffusion de chaleur, de diffusion de masse et de changement de phase solide/liquide, tout en intégrant les modifications des équilibres chimiques locaux.

Les travaux réalisés au cours du stage contribueront au développement de cette maquette numérique. Plus particulièrement, il s'agira de simuler numériquement une expérience de chauffage laser réalisé sur un combustible oxyde mixte d'uranium et de plutonium vierge. Pour cela, l'étudiant utilisera le code aux éléments finis SLOTH [2], dédié aux simulations par champ de phase de l'évolution physico-chimique des matériaux.

Après une prise en main de l'environnement logiciel et une revue bibliographique ciblée, une démarche à complexité croissante sera suivie pour atteindre les objectifs du stage:

- la première étape du travail consistera à reproduire la simulation de chauffage laser proposée dans [3] pour un combustible UO_2.
- la seconde étape consistera à étendre cette simulation au cas d'un combustible $(U, Pu)O_2$.
- la dernière étape consistera à valider les simulations numériques en comparant les prédictions à des résultats expérimentaux disponibles au CEA. Cette comparaison pourra également contribuer à l'optimisation du modèle numérique.

En contribuant au développement d'un outil de calcul, l'étudiant pourra acquérir une gamme variée de compétences, en travaillant sur les points suivants:

Modélisation physique : les phénomènes couplés étudiés sont le transfert de masse et de chaleur, le changement de phase solide/liquide et les équilibres chimiques locaux.

Développement numérique : les équations seront implantées dans le code aux éléments finis SLOTH [2], dédié aux simulations par champ de phase de l'évolution physico-chimique des matériaux.

Validation et applications : Confronter les prédictions du modèle aux données expérimentales et à autres modèle disponibles dans le code.

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone, basé sur le site du CEA Cadarache. 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.

Ce stage est réalisé en collaboration avec les équipes expérimentales de l'institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone, basé sur le site de Marcoule.

Un bon déroulement du stage pourra être suivi par une thèse de doctorat au sein des équipes de l'unité d'accueil.

[1] DESAGULIER,Marie-Margaux. *Elaboration d'oxydes mixtes (U, Pu) O2-x à forte teneur en plutonium et mesure de leurs propriétés thermodynamiques et structurales*. 2023. Thèse de doctorat. Université de Montpellier.

[2] https://github.com/Collab4Sloth/SLOTH

[3] WELLAND, Michael Joshua. *SIMULATION OF MELTING URANIUM DIOXIDE NUCLEAR FUEL*. 2009. Thèse de doctorat. Royal Military College of Canada.

- Formation souhaitée :

Mécanique, Matériaux, Calcul Scientifique, Simulation Numérique, Physique appliquée, Physico-chimie des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

SLOTH, MFEM

- Mots clés :

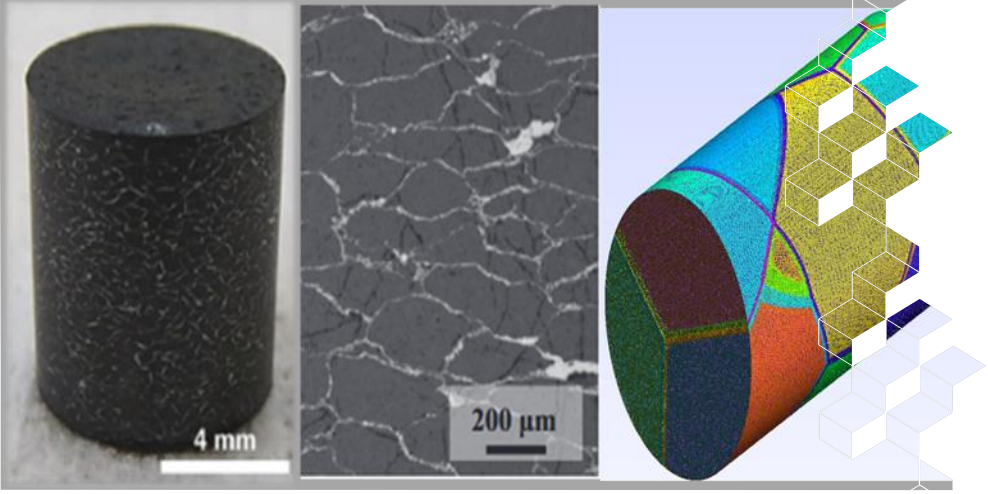
Chauffage laser, changement de phase, élément finis,

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

C. Introïni, Ph. Martin, T. Barani
clement.introini@cea.fr
philippe-m.MARTIN@cea.fr
tommaso.barani@cea.fr



Analyse et compréhension du comportement thermomécanique des CERMET microcellulaires UO_2-Cr et UO_2-Mo

DEC/SESC/LECIM

Les combustibles ATF (Advanced Technology Fuels) de type CERMET microcellulaire sont développés à l'international pour améliorer la sûreté des centrales nucléaires. Ces combustibles permettent de baisser les températures de fonctionnement, limitant ainsi le risque de fusion en cas d'accident. La modélisation et la simulation sont des outils fondamentaux en support à l'analyse des données expérimentales et de la compréhension du comportement de ces combustibles.

Dans les combustibles ATF de type CERMET (CERamique-METal), un composé métallique est ajouté à l'échelle microscopique pour améliorer la conductivité thermique du milieu et ainsi abaisser la température à cœur du combustible ainsi que son enthalpie stockée. La quantité de métal en proportion volumique ne dépasse pas 10%. Dans le CERMET de type microcellulaire, le métal enrobe les granulats de matière fissile (UO_2) en constituant un réseau métallique continu qui aide l'évacuation de la chaleur. Les métaux généralement utilisés sont le chrome et le molybdène.

Le SESC (Service d'Etude et de Simulation du Comportement des Combustibles du CEA) développe plusieurs outils de calculs à différentes échelles permettant de simuler le comportement multiphysique de ces combustibles, d'aider à l'analyse et à la compréhension des mesures expérimentales disponibles. Ces outils (ALCYONE, MEROPE, MFEM-MGIS, LICOS), sont intégrés dans la plateforme logicielle de simulation du comportement des combustibles PLEIADES.

Les travaux de stage porteront sur la simulation du comportement thermomécanique des CERMET microcellulaires de type UO_2-Cr à l'aide des outils de calcul scientifique éléments finis. Les simulations seront en support à l'analyse des caractérisations thermomécaniques qui seront effectuées au CEA sur des échantillons CERMET UO_2-Cr. L'objectif du travail est d'apporter des données de validation et améliorer les modèles développés dans les codes de la plateforme PLEIADES. En plus de ce travail d'analyse, le ou la stagiaire pourra prédimensionner certains essais en interaction avec les équipes expérimentales chargées de leurs réalisations.

Parmi les aspects qui seront étudiés on peut mentionner : l'analyse et l'interprétation des expérimentations, l'analyse de l'effet de la distribution et de la teneur du métal dans les échantillons sur les mesures thermiques et mécaniques, la caractérisation de la conductivité thermique des échantillons analysés.

En plus, des compétences en mécanique des solides requise et une appétence pour le calcul scientifique, ce stage permettra à l'étudiant de consolider ses compétences sur la thermomécanique des milieux hétérogènes. L'étudiant intègrera une équipe multidisciplinaire travaillant sur le sujet, sa capacité de communication, d'échange et de synthèse seront appréciées.

- Formation souhaitée :

Master II ou école d'ingénieur en mécanique des solides, calcul scientifique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Eléments finis

- Mots clés :

Thermique, mécanique, méthodes numériques

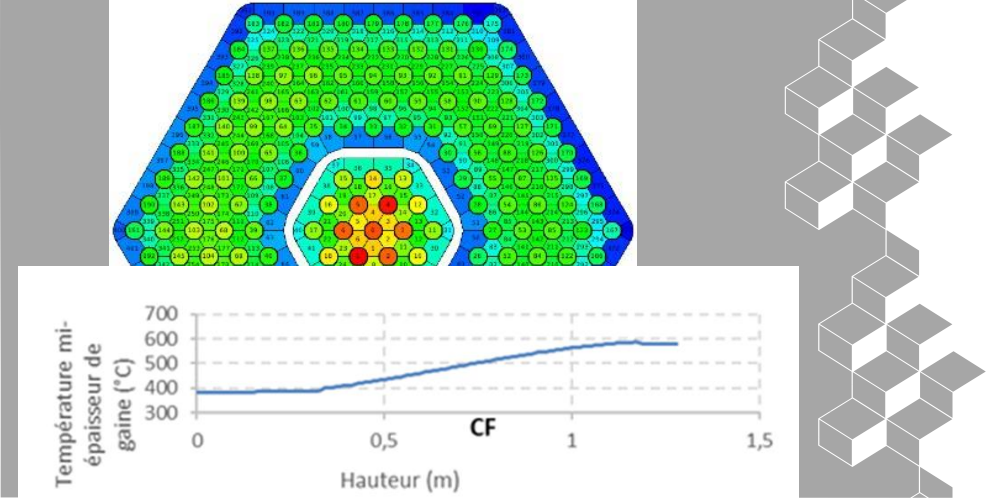
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

D'AMBROSI Veronica, REYMOND Matthieu

Veronica.dambrosi@cea.fr,
Matthieu.REYMOND@cea.fr



Evaluation des comportements thermohydraulique et thermomécanique d'aiguilles combustible de type RNR-Na

DEC/SESC/LECIM et LEVA

Dans les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR), les éléments combustible, appelés aiguilles, sont constitués de pastilles combustible gainées dans un tube métallique étanche, et regroupés en faisceau dans un tube hexagonal, l'ensemble formant l'assemblage combustible. Lorsque le réacteur est en fonctionnement, la puissance produite par le combustible est dissipée dans le caloporteur. En fonction de l'emplacement de l'assemblage dans le cœur du réacteur, du débit du caloporteur ou encore de sa proximité avec les barres de contrôle de la réactivité du cœur, la température maximale de la gaine et sa position dans l'assemblage évoluent.

TRIO-MC est un Outil de Calculs Scientifiques (OCS) spécifiquement conçu pour évaluer la température des gaines, et permettra lors de ce stage, de réaliser des calculs thermohydrauliques d'assemblages particuliers via un schéma de calcul, dit "détaillé", qui permet de modéliser des assemblages expérimentaux. Le comportement thermique des gaines sera validé par rapport aux résultats acquis antérieurement. Il permettra ensuite de calculer le comportement thermomécanique d'une aiguille combustible de cet assemblage durant l'irradiation à partir de l'OCS GERMINAL et de confronter les résultats aux données expérimentales disponibles et à l'état de l'art.

Objectifs :

L'objectif du stage sera dans un premier temps, d'adapter l'outil de pré/post-traitement associé aux OCS TRIO-MC et GERMINAL à des faisceaux d'aiguilles expérimentales de gros diamètre, et dans un second temps de réaliser les calculs thermohydraulique et thermomécanique pour évaluer le comportement sous irradiation de ces aiguilles pendant toute la durée d'irradiation. Les calculs thermomécaniques de comportement du combustible pourront être réalisés sur un ou plusieurs objets expérimentaux en fonction de l'avancée du stage.

Étapes du stage :

Phase 1 : Prendre en main l'OCS TRIO-MC et adapter l'outil de pré/post-traitement à des aiguilles expérimentales de gros diamètre,

Phase 2 : Réaliser des calculs thermohydrauliques avec TRIO-MC, analyser et valider les résultats des calculs,

Phase 3 : Réaliser des calculs thermomécaniques avec GERMINAL, analyser et valider les résultats des calculs.

Relations/collaboration :

Collaborations au sein des différentes unités du département d'études des combustibles

- Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Outils de calculs scientifiques TRIO-MC et GERMINAL sous linux, python, MS Word Excel

- Mots clés :

RNR-Na – thermohydraulique – comportement thermomécanique – Python

- Possibilité de thèse :

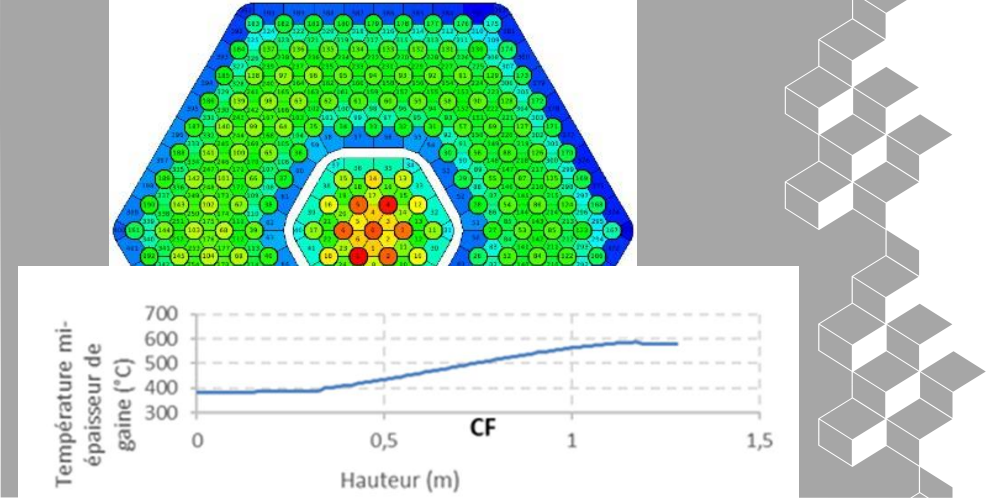
Non

- Contact :

DEVEAUX Eric et VIALLARD Isabelle

eric.deveaux@cea.fr

isabelle.viallard@cea.fr



Assessment of SFR fuel pins thermal hydraulic and thermomecanical behaviours

DEC/SESC/LECIM and LEVA

In Fast Neutron Reactors (RNR or SFR), fuel elements, also known as pins, contain the fuel pellets which are inserted in a sealed metal cladding and are distributed in a triangular pitch in a hexagonal wrapper tube, the whole forming an assembly. When the reactor is in operation, the power produced by the fuel is dissipated in the coolant. Depending on the location of the subassembly in the core, the coolant flow rate, or its proximity to control rods, the cladding maximum calculated temperature and its position in the assembly changes.

TRIO-MC, a scientific computing code, is specifically designed to assess the cladding temperatures and will allow, during this internship, to perform the thermohydraulic calculations of particular SFR assemblies, using a so-called "detailed" calculation scheme, required for such experimental subassemblies. The thermal behaviour of the clad will be validated from results of previous studies. Then, it will be possible to assess the fuel pin thermomechanical behaviour during irradiation from the fuel performance code GERMINAL and to compare the results obtained to available experimental data and state of the art.

Objectives :

The objective of the internship will be, as a first step, to adapt the pre/post treatment tool associated to TRIO-MC and GERMINAL OCS to experimental large diameter pin bundle, and as a second step, to perform thermohydraulic and thermomechanical computations to assess the behaviour under irradiation of the fuel pins. Thermomechanical calculations will be performed for one or several experimental objects depending on the internship progress.

Stages of internship :

Stage 1 : Familiarize yourself with TRIO-MC OCS and adapt the pre/post treatment tool to large diameter experimental pins,

Stage 2 : Perform thermohydraulic calculations with TRIO-MC, analyze and then validate the results from previous studies,

Stage 3 : Perform thermomechanical calculations with GERMINAL, analyze and then validate the results from experimental available data.

Relations/collaboration :

Collaboration within the Fuel Studies Departement

- Formation souhaitée :

Master 2 or final year of engineering school

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

TRIO-MC and GERMINAL scientific computational codes under linux, python, MS Word Excel

- Mots clés :

SFR – thermohydraulic – thermomechanical behaviour – python

- Possibilité de thèse :

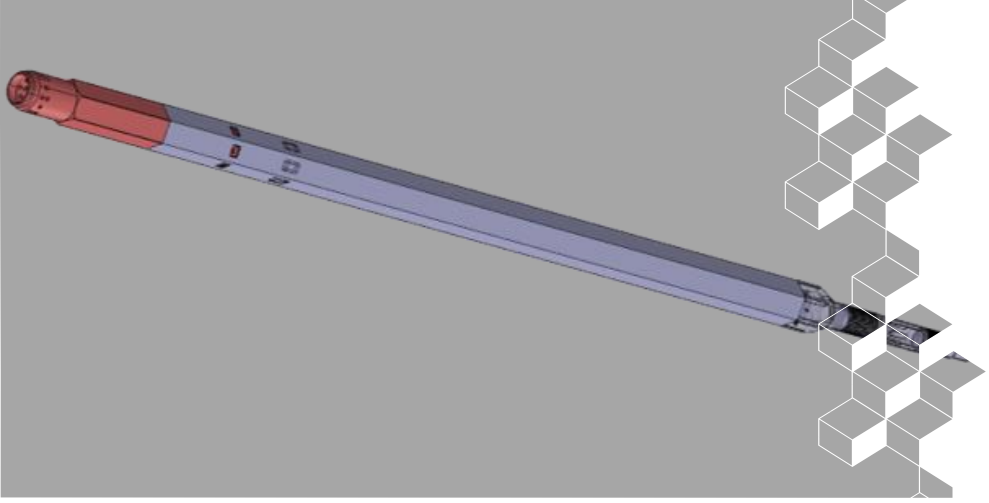
No

- Contact :

DEVEAUX Eric & VIALLARD Isabelle

eric.deveaux@cea.fr

isabelle.viallard@cea.fr



Mise en place d'un outil de pré-conception pour la thermomécanique des assemblages combustibles RNR

DEC/SESC/LECIM

Dans le cadre du développement des réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) réalise la conception et le dimensionnement du cœur de ces réacteurs. Celui-ci 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 actuelle prévoit un déploiement des RNR sur la 2ème moitié du siècle.

Objectifs :

Dans ce cadre, 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.

L'objectif principal du stage est de mettre en place un outil d'aide à la pré-conception de ces éléments combustibles, afin de faciliter la conception et le dimensionnement des futures esquisses. Cet outil pourra être développé, par exemple, en langage Python.

Pour réaliser cet outil, le stagiaire s'appuiera sur le savoir-faire du LECIM, et pourra également être en lien avec des experts du Département d'Etude des Réacteurs.

Cet outil inclura les caractéristiques géométriques et matériaux des éléments combustibles ainsi que les principaux phénomènes physiques auquel ils sont soumis : irradiation, thermique et mécanique. Il permettra, lors d'une phase de pré-conception d'un élément combustible RNR, de déterminer rapidement des premières valeurs de certains paramètres d'importance (géométriques principalement) et de quantifier les sensibilités aux différents paramètres d'entrée.

Il sera par ailleurs le plus flexible possible afin de pouvoir s'adapter à des géométries variées et innovantes. La possibilité de visualiser l'élément combustible conçu via une interface graphique serait également un plus.

- Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Conception, Dimensionnement, Python

- Mots clés :

Conception, assemblage, combustible, RNR-Na, thermomécanique

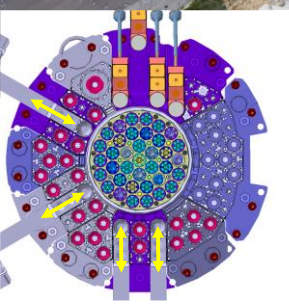
- Possibilité de thèse :

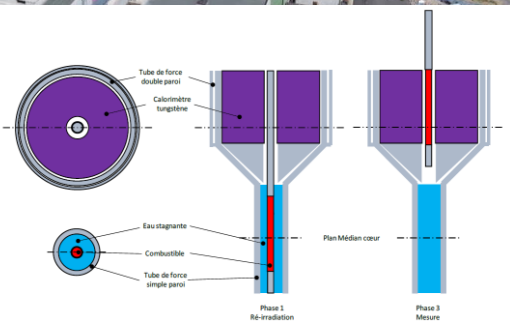
Non

- Contact :

DUPONT Vincent
vincent.dupont@cea.fr

Etudes thermomécaniques en support à la pré-conception du dispositif PRESTO de mesures de puissance résiduelle





DEC/SESC & DER/SERJH & DER/SPRC

Les combustibles nucléaires après leurs phases de fonctionnement dégagent une puissance résiduelle provenant majoritairement de la décroissance radioactive de certains isotopes et de fissions résiduelles. L'évacuation de cette puissance thermique doit être maitrisée durant toutes les phases en aval de l'arrêt du réacteur.

L'évolution de la puissance résiduelle des combustibles nucléaires après un arrêt d'un réacteur de puissance est une grandeur à maitriser durant le fonctionnement normal (arrêt de tranche) ou incidentel (arrêt d'urgence). L'évolution de cette puissance dans des temps courts est mal connue et conduit à prendre des conservatismes dans le dimensionnement des systèmes de sûreté / sécurité.

Le dispositif PRESTO, qui sera implanté dans le réacteur de recherche RJH du CEA, est destiné à mesurer la puissance résiduelle d'un combustible nucléaire dans un temps très court après un arrêt d'urgence du réacteur.

La mesure de la puissance résiduelle sera réalisée par un calorimètre après extraction du crayon combustible de la zone d'irradiation en eau et positionnement au droit du système de mesure (dénoyage du crayon combustible)

Objectifs :

L'objectif du stage est de réaliser une étude paramétrique visant à valider la faisabilité de la séquence expérimentale envisagée.

Les différentes phases de l'expérience dans le RJH (principalement l'irradiation du combustible jusqu'à l'arrêt réacteur puis la phase de mesure après dénoyage de l'échantillon) seront étudiées et calculées à l'aide d'outils de calculs du CEA et à partir de modèles analytiques.

L'objectif final est de vérifier la non atteinte de températures combustible menant à une dégradation rédhibitoire de l'échantillon durant la phase de mesure.

Etapes du stage :

Phase 1 :

Appropriation des données d'entrée et constitution des séquences de mesures de référence et des paramètres de conception de l'échantillon.

Phase 2 :

Réalisation des calculs paramétriques de la phase d'irradiation puis de la phase de mesure

Phase 3 :

Etablissement d'une ou plusieurs configurations de référence (conception échantillon et séquence de mesures) permettant de garantir l'absence de dégradation du combustible (rupture de sa gaine)

Phase 4 :

Rédaction d'un rapport technique à l'issue de ces travaux

Relations / Collaboration :

Le stage sera réalisé en collaboration avec 3 unités du CEA Cadarache – le service d'étude et de simulation du comportement du combustible, le service de physique des réacteurs et du cycle et le service d'exploitation du réacteur RJH

- Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur (mécanique, thermique, méthodes numériques)

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Calculs analytiques
Outils de calculs du CEA

- Mots clés :

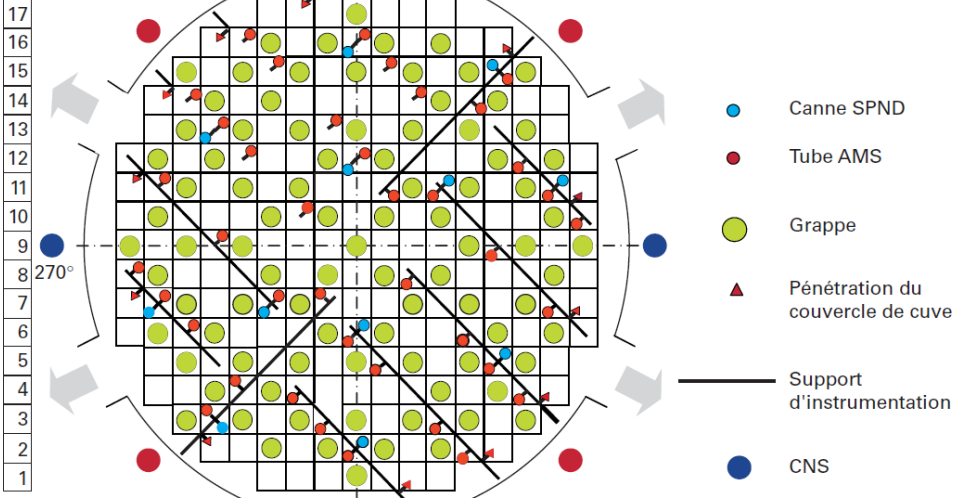
Thermomécanique, PRESTO, RJH, Puissance résiduelle

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

thierry.lambert@cea.fr
lionel.ferry@cea.fr
Laura.core@cea.fr
maxime.zabiego@cea.fr



Conception / Dimensionnement d'une source nucléaire pour le démarrage des futurs réacteurs

DEC/SESC/LECIM

Le combustible utilisé pour calibrer le démarrage des réacteurs industriels est actuellement acheté à l'étranger. Or, au vu de la conjoncture internationale, la France vise à gagner en souveraineté en utilisant des matière présentes dans nos déchets nucléaires afin de concevoir ces sources nucléaires pour les prochains réacteurs (EPR2). Le stage s'inscrit dans la conception et le dimensionnement de ces sources de démarrage.

Les sources neutroniques de démarrage (SND) sont utilisées lors de la phase de démarrage d'un réacteur afin de calibrer l'instrumentation de contrôle de flux neutronique. Les matériaux qui constituent la source sont du béryllium métallique et de l'oxyde d'américium issu du retraitement des déchets nucléaire.

Le Laboratoire d'Etudes et d'Irradiations Multifilière (LECIM) est en charge de la conception thermo-mécanique de ces sources. Une pré-conception a été réalisée au cours de l'année 2024 montrant l'atteinte des performances neutroniques de la source en respectant l'encombrement contraint dans l' assemblage combustible. Un pré-dimensionnement a également été réalisé à l'aide de simulations numériques aux éléments finis via le code LICOS (développé au CEA), montrant le respect des critères thermo-mécaniques en cours d'exploitation.

Les travaux de stage porteront sur la consolidation de la conception et du dimensionnement de ces sources via l'analyse de sensibilité et la propagation d'incertitudes des paramètres de fabrication. Pour cela le stagiaire reprendra le schéma de calcul déjà développé pour la pré-conception et le pré-prédimensionnement et l'adaptera à l'outil d'analyse de données URANIE développé au CEA.

Les aspects abordés au cours du stage sont : la thermique, la mécanique des structures, la résistance des matériaux, la simulation par éléments finis et l'analyse de données par plan d'expérience. Ces deux derniers aspects s'accompagnent de compétences en programmation. Chaque compétence peut-être consolidée au cours du stage mais le tout implique rigueur et une bonne capacité à analyser les résultats.

- Formation souhaitée :

Master II en mécanique des solides, calcul scientifique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Eléments finis (LICOS)
Analyse de données (URANIE)
Python

- Mots clés :

Thermique, mécanique, méthodes numériques, analyse de données

- Possibilité de thèse :

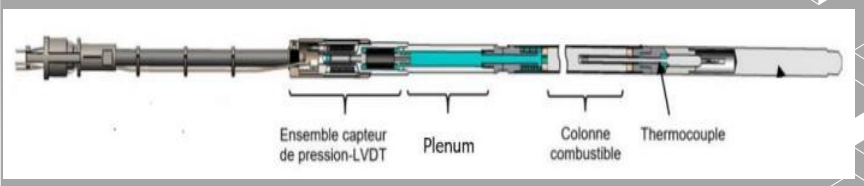
non

- Contact :

Luc PORTELETTE,
Luc.portelette@cea.fr

Maxime ZABIEGO
Maxime.zabiego@cea.fr

Dimensionnement d'un crayon expérimental et détermination des conditions d'irradiation à l'aide de l'Outil de Calcul Scientifique ALCYONE



DEC/SESC/LECIM

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet P2M qui est un programme d'irradiation international en collaboration avec EDF et avec le SCK°CEN (Belgique), et hébergé au sein du réseau FIDES-II de l'OCDE.

Ce programme consiste à irradier dans le réacteur expérimental BR2 en Belgique des crayons UO_2 instrumentés d'un capteur de pression et d'un capteur de température jusqu'à atteindre la fusion partielle du combustible sans rupture de la gaine afin d'améliorer la prédiction des outils de calculs quant à l'occurrence de la fusion et conforter certaines données de sûreté établies par le passé. Deux irradiations à fusion seront réalisées dans le cadre de ce programme :

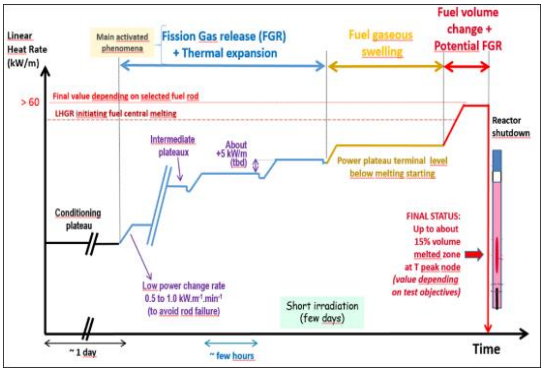
- **l'essai P2M-Q2 qui vise à atteindre une fusion partielle du combustible de l'ordre de 10% volumique au plan flux max– fin 2026,**
- **l'essai P2M-T1 qui vise à atteindre une fusion partielle du combustible de l'ordre de 15% volumique au plan flux max – 2028.**

L'outil de calcul scientifique ALCYONE de la plateforme logicielle PLEIADES est utilisé pour déterminer la taille du plenum (volume libre), la pression de remplissage dans le crayon et les conditions d'irradiation afin de respecter la gamme de fonctionnement du capteur de pression ainsi que les critères de sûreté donnés par EDF relatifs à la tenue de la gaine sous irradiation. Les crayons instrumentés sont fabriqués au LECA-STAR à Cadarache à partir de crayons UO2 irradiés plusieurs cycles en REP avant d'être envoyés en Belgique afin d'être irradiés en rampe de puissance lente par paliers jusqu'à l'atteinte de la fusion partielle du combustible.

Le stage consiste dans un premier temps à recalculer l'irradiation P2M-Q2 (fabrication du crayon début 2026 et irradiation fin 2026) afin de prendre en main l'outil de calcul ALCYONE, puis d'optimiser l'historique d'irradiation afin de diminuer la déformation radiale maximale de la gaine.

La seconde étape du stage consistera à réaliser les calculs de l'irradiation P2M-T1 qui se tiendra en 2028 afin de dimensionner la taille du plenum et déterminer la puissance maximale pour atteindre les 15% volumique de combustible fondu.

Les calculs se feront avec le code de calcul ALCYONE sous un environnement LINUX. Le post-traitement peut s'effectuer sur excel mais il préférable de maitriser le langage bash ou python pour le faciliter et l'automatiser.



[Nuclear Energy Agency (NEA) - Power to Melt and Maneuverability (P2M) - FIDES Joint ExpErimental Programme (JEEP)]

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master. Formation généraliste à composante Génie nucléaire ou Simulation ou Mécanique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Outil de Calcul Scientifique ALCYONE

- Mots clés :

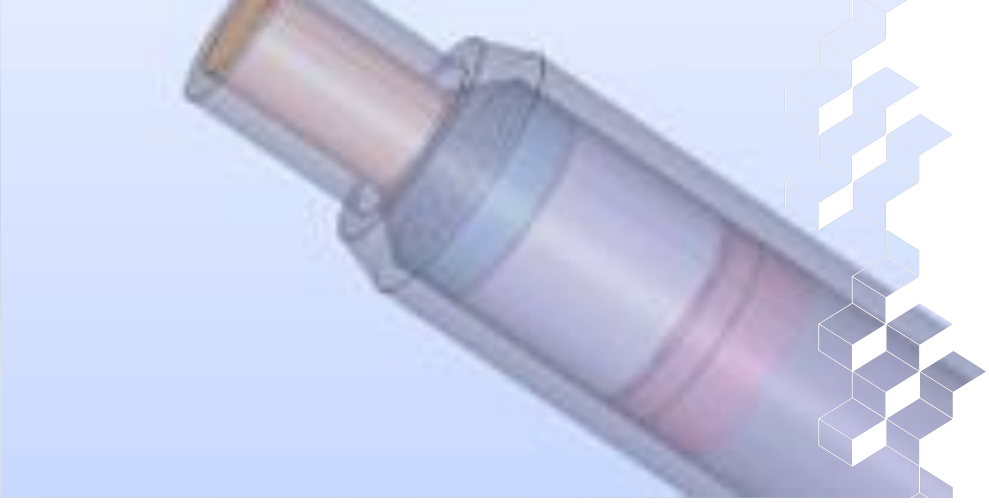
P2M, Combustible, Irradiation, Simulation, Fusion, Dimensionnement

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

VERNIER Anaëlle
anaelle.vernier@cea.fr



Dimensionnement thermomécanique d'un dispositif de gestion de l'APRP pour crayon REP

DEC/SESC/LECIM

Le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) valorise son expérience dans le domaine des combustibles nucléaires et des matériaux structuraux en mettant ses compétences au service de projets d'innovation très divers. Parmi ceux-ci figure un projet dont l'objectif est de dimensionner un dispositif de gestion de l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire pour un crayon combustible de Réacteur à Eau Pressurisée.

Cette proposition de stage fait suite à 2 stages précédents qui ont posé les bases d'une étude de **conception**, dont il s'agit ici de réaliser la concrétisation en effectuant le **prédimensionnement *thermomécanique*** du dispositif considéré. Diverses conceptions ont été identifiées, avec des variantes caractérisées par des options en termes de matériaux, géométrie… qu'il s'agit de préciser au travers d'une **optimisation** vis-à-vis des **contraintes** associées au fonctionnement du système considéré.

Le prédimensionnement sera basé sur l'utilisation d'un code aux **éléments finis** (basé sur Cast3m). Il s'agira d'analyser les **paramètres de contrôle** du dispositif étudié, de réaliser une **mise en données paramétrique** (maillage, conditions aux limites, matériaux…) et les **calculs thermomécaniques** associés ainsi que leur **post-traitement** (Python), et enfin de conduire une **analyse d'incertitudes** (plateforme Uranie) permettant de caractériser la **sensibilité** du dispositif à ses paramètres, afin d'en réaliser une **optimisation**. Plusieurs variantes de dispositifs sont à analyser, afin d'identifier celles qui répondent le mieux à un cahier des charges applicatif (flexibilité, fiabilité…)

- Formation souhaitée :

Formation master 2 ou 5ème année d'école d'ingénieur avec de ***solides compétences en calculs thermomécaniques***

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Calculs aux éléments finis (Cast3m / Licos). Etudes d'incertitudes (Uranie) , Python

- Mots clés :

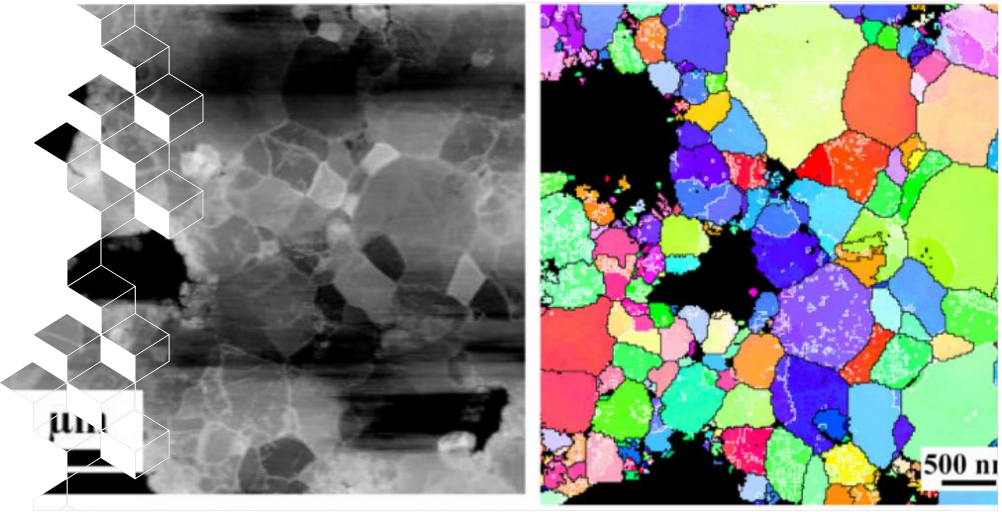
Dimensionnement mécanique, Eléments finis, incertitudes

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

ZABIEGO Maxime
maxime.zabiego@cea.fr



Modélisation numérique de la transformation des matériaux sous irradiation: application au combustible nucléaire

DEC/SESC/LEVA

L'endommagement des combustibles nucléaires dû à l'irradiation peut induire des transformations microstructurales radicales, susceptible d'impacter significativement les propriétés thermomécaniques du combustible (conductivité thermique, propriétés élastiques, gonflement).

Ce stage s'inscrit dans un projet de modélisation de la transformation sous irradiation de la microstructure du combustible nucléaire. Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone, basé sur le site du CEA Cadarache à 30 minutes d'Aix en Provence dans le sud-est de la France.

L'objectif de ce stage sera de mettre en œuvre des évolutions dans la modélisation physique de la restructuration du combustible à basse température intervenant dans les SMR (Small Modular Reactor) calogènes. Ces travaux serviront de base pour une future intégration dans la plateforme PLEIADES [1].

En contribuant au développement d'un outil de calcul, l'étudiant pourra acquérir une gamme variée de compétences, en travaillant sur les points suivants:

- Modélisation physique : améliorer la représentation de l'évolution des défauts d'irradiation, depuis les défauts ponctuels jusqu'aux dislocations, en intégrant les mécanismes de nucléation, de croissance et d'interaction des défauts.
- Développement numérique : optimiser les méthodes d'intégration numérique pour résoudre efficacement le système «*raide*» d'équations différentielles couplées décrivant l'évolution temporelle du matériau sous irradiation.
- Analyse thermomécanique du combustible nucléaire : contribuer au développement du modèle afin de l'utiliser dans un outil de simulation thermique et mécanique du combustible nucléaire en réacteur.
- Validation et applications : confronter les prédictions du modèle amélioré aux données expérimentales disponibles dans des conditions d'irradiation variées (température, taux de fission).

Ce stage contribuera au développement d'outils de calcul scientifique plus robustes et prédictifs pour la simulation des performances des combustibles nucléaires sous irradiation, afin de les utiliser pour la conception des réacteurs du futur.

[1] https://www.cea.fr/energies/iresne/Pages/Nos%20plateformes%20de%20recherche/Comportement%20des%20combustibles.aspx

- Formation souhaitée :

Mécanique, Matériaux, Mathématiques appliquées, Physique appliquée, Physico-chimie des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, notions de C++ serait un plus

- Mots clés :

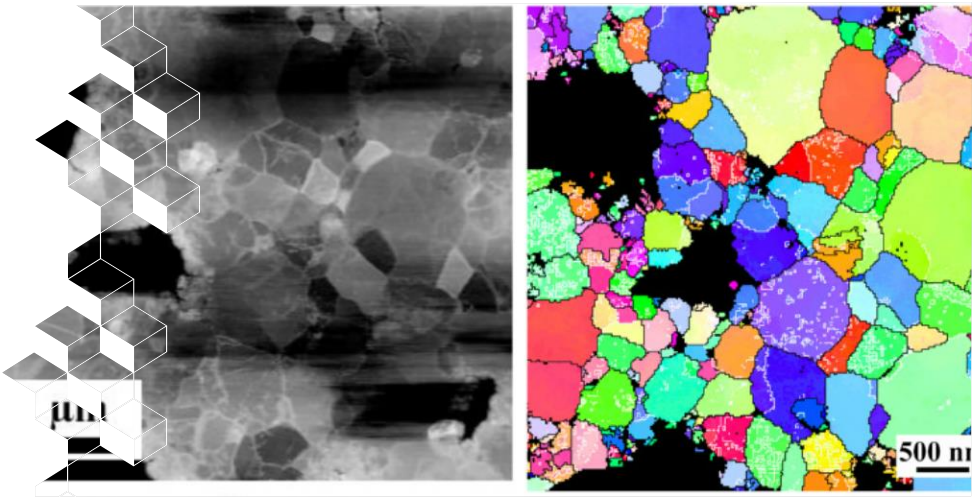
Combustible nucléaire, dislocations, thermomécanique, intégration EDO, défauts cristallins

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

BARANI Tommaso, BERNACHY-BARBE Fabien
tommaso.barani@cea.fr
fabien.bernachy-barbe@cea.fr



Modeling material microstructure evolution under irradiation: the case of nuclear fuel

DEC/SESC/LEVA

Nuclear fuel damage due to irradiation can induce radical microstructural transformations, which can significantly impact the thermomechanical properties of the fuel (thermal conductivity, elastic properties, swelling).

This internship is part of a project on modeling nuclear fuel microstructure transformation under irradiation at CEA IRESNE.

The goal of the internship is to refine the modeling of nuclear fuel microstructure evolution under irradiation, specifically targeting recrystallization at low temperatures. The work will serve as a pathway to integrate these modeling efforts into the simulation platform PLEIADES [1], developed in the hosting unit.

By contributing to the development of an engineering-scale computational tool, the student will be able to acquire a varied range of skills by working on:

- Physical modeling: improve the representation of irradiation defect evolution, from point defects to dislocations, by integrating defect nucleation, growth, and interaction mechanisms.
- Numerical development: optimize numerical integration methods to efficiently solve the "stiff" system of coupled differential equations describing the temporal evolution of the material under irradiation.
- Thermomechanical analysis of nuclear fuel: contribute to model development in order to use it in a thermal and mechanical simulation tool for nuclear fuel in reactor.
- Validation and applications: Compare the predictions of the improved model with experimental data available under various irradiation conditions (temperature, fission rate).

This internship will contribute to the development of more robust and predictive scientific computing tools for simulating nuclear fuel performance under irradiation, in order to use them for future reactor design.

[1] https://www.cea.fr/energies/iresne/Pages/Nos%20plateformes%20de%20recherche/Comportement%20des%20combustibles.aspx

- Formation souhaitée :

Condensed matter physics, nuclear or material engineering, computer science or applied math

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

Python, knowledge of C++ would be a plus.

- Mots clés :

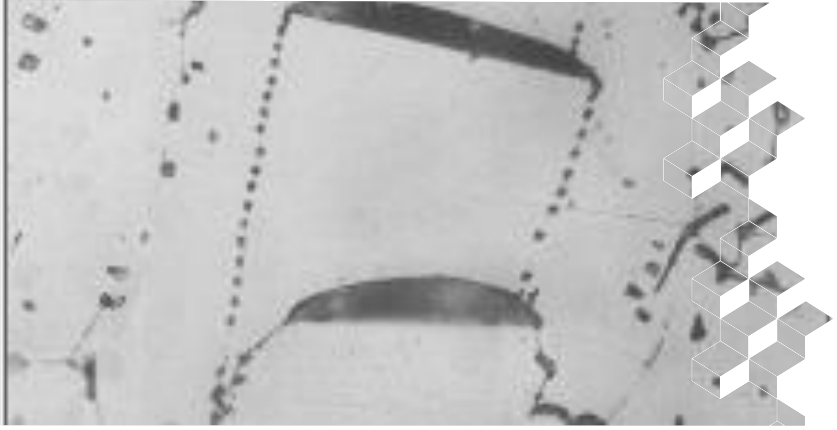
Nuclear fuel, thermomechanics, numerical methods for ODEs, crystal defects

- Possibilité de thèse :

No

- Contact :

BARANI Tommaso, BERNACHY-BARBE Fabien
tommaso.barani@cea.fr
fabien.bernachy-barbe@cea.fr



Simulation par champ de phase de la migration des porosités dans le combustible nucléaire

DEC/SESC/LEVA

Dans les réacteurs à neutrons rapides, la combinaison de températures élevées et de gradients radiaux de température très raides au sein des combustibles oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (U, Pu)O_{2-x} provoque la migration des porosités issues de la fabrication.

Ce stage s'inscrit dans un projet du CEA visant à modéliser et simuler l'évolution de la porosité dans les combustibles oxydes mixtes d'uranium et de plutonium utilisés dans les réacteurs à neutrons rapides. Comprendre le comportement de ces porosités est un enjeu pour optimiser les performances du combustible et, dans ce contexte, un des objectifs majeur est d'évaluer précisément la vitesse de migration des porosités dans le combustible.

Pour cela, une des approches suivie par les équipes du département d'étude des combustibles du CEA consiste à développer des outils de simulation numérique basés sur la méthode du champ de phase pour prédire le comportement des porosités de fabrication.

Ce stage vise à contribuer au développement de ces outils en implémentant dans un solveur éléments finis HPC [1] un modèle de la littérature [2]. L'objectif de ce travail est double: il s'agit d'une part, de mieux comprendre la modélisation déjà publiée à l'échelle internationale pour répondre à cette problématique tout en mettant en évidence les limites de ces premiers modèles. Ainsi, dans un second temps, les résultats obtenus pourront être comparés à ceux obtenus par un nouveau modèle développé par l'équipe encadrante. Cette comparaison pourra également contribuer à l'optimisation du modèle de champ de phase du CEA.

En contribuant au développement d'un outil de calcul, l'étudiant pourra acquérir une gamme variée de compétences, en travaillant sur les points suivants:

Modélisation physique : les phénomènes qui régissent la migration de la porosité seront décrits par la méthode du champ de phase, qui permet de simuler l'évolution spatio-temporelle d'une interface continue entre deux phases, ainsi que du transport de la chaleur.

Développement numérique : les équations seront implantées dans le code aux éléments finis SLOTH [1], dédié aux simulations par champ de phase de l'évolution physico-chimique des matériaux.

Analyse de l'évolution microstructurale du combustible sous irradiation : le modèle sera utilisé pour étudier l'évolution de la morphologie des porosités pendant leur mouvement.

Validation et applications : Confronter les prédictions du modèle aux données expérimentales et à d'autres modèles disponibles dans le code.

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone, basé sur le site du CEA Cadarache. 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. Un bon déroulement du stage pourra être suivi par une thèse de doctorat au sein des équipes de l'unité d'accueil.

[1] https://github.com/Collab4Sloth/SLOTH

[2] C. Liu et al., Nucl. Eng. Des. 425, 2024

- Formation souhaitée :

Mécanique, Matériaux, Mathématiques appliquées, Physique appliquée, Physico-chimie des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

C++

- Mots clés :

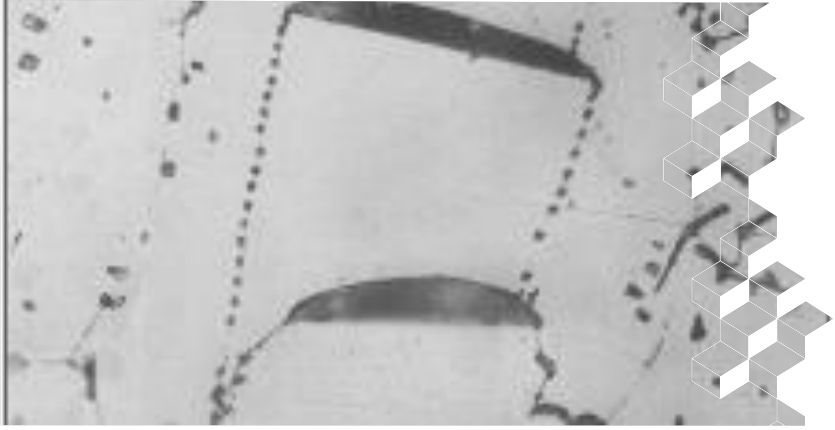
Combustible nucléaire, champ de phase, porosité

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

BARANI Tommaso, INTROÏNI Clément
tommaso.barani@cea.fr
clement.introini@cea.fr



Phase field simulation of porosity migration in oxide nuclear fuels

DEC/SESC/LEVA

In fast neutron reactors, the combination of high temperatures and very steep radial temperature gradients in mixed uranium and plutonium oxide $(U, Pu)O_{2-x}$ fuels causes the migration of porosities resulting from sintering.

This internship is part of a CEA project aimed at modeling and simulating the evolution of porosity in mixed uranium and plutonium oxide fuels used in fast neutron reactors. Understanding the behavior of these porosities is key to optimizing fuel performance and, in this context, one of the main objectives is to accurately assess the rate of porosity migration in the fuel.

To this end, one of the approaches taken by the teams in the CEA fuel research department (DEC) is to develop numerical simulation tools based on the phase field method to predict the behavior of manufacturing porosity.

This internship aims to contribute to the development of these tools by implementing a phase field model from the literature [1] in an HPC finite element solver [2]. The objective of this work is twofold: on the one hand, to better understand the modeling already published internationally to address this issue, while highlighting the limitations of these initial models. In a second step, the results obtained can be compared with those obtained by a new model developed by the supervising team. This comparison may also contribute to the optimization of the CEA phase field model.

By contributing to the development of a calculation tool, the student will acquire a wide range of skills, working on the following points:

- Physical modeling: the phenomena governing porosity migration will be described using the phase field method, which simulates the spatiotemporal evolution of a continuous interface between two phases, as well as heat transport.
- Numerical development: the equations will be implemented in the SLOTH HPC finite element code [2], dedicated to phase field simulations of the physicochemical evolution of materials.
- Analysis of the microstructural evolution of fuel under irradiation: the model will be used to study the evolution of the morphology of porosities during their movement
- Validation and applications: compare the model predictions with experimental data and other models available in the code.

The internship is offered at the research institute on nuclear systems for low-carbon energy production (IRESNE), based at the CEA Cadarache site. The institute conducts R&D activities on nuclear fuels with the aim of increasing the safety and performance of current reactors and developing fuels for future reactors. These activities combine numerical simulation/modeling and experimentation. A successful internship may be followed by a doctoral thesis within the host units.

[1] C. Liu et al., Nucl. Eng. Des. 425, 2024.

[2] https://github.com/Collab4Sloth/SLOTH

- Formation souhaitée :

Condensed matter physics, nuclear or material engineering, computer science or applied math

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

C++

- Mots clés :

Nuclear fuel, phase field, porosity, microstructural evolution

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

BARANI Tommaso, INTROÏNI Clément

tommaso.barani@cea.fr
clement.introini@cea.fr

Effet de la porosité sur la conductivité thermique du matériau combustible MOX (U,Pu)O2

DEC/SESC/LEVA

Le but de ce stage est d'évaluer l'effet de la quantité et de la forme des pores sur la conductivité thermique des combustibles nucléaires. Un des aspects novateurs de cette étude réside dans l'utilisation de mesures récentes de propriétés thermiques sur des matériaux présentant des microstructures différentes.

La performance des combustibles nucléaires dépend fortement de leur comportement thermomécanique, et donc de leur conductivité thermique. Cette propriété dépend essentiellement de la microstructure du matériau qui peut présenter des hauts niveaux de porosité, notamment dans le cas des oxydes mixtes d'uranium et de plutonium utilisés dans les réacteurs rapides.

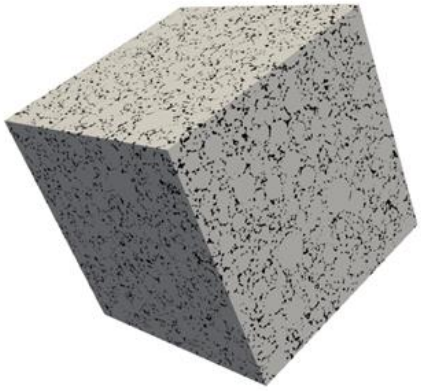
Un premier modèle de conductivité a été établi pour prendre en compte la présence de porosité, mais il n'a pas été validé pour des porosités supérieures à 15%, et il ne prend pas en compte la forme des pores.

Une première étape du stage sera de reprendre une modélisation réalisée avec l'outil MEROPE développé au CEA (C++, interface PYTHON) et l'adapter aux caractéristiques des combustibles fabriqués.

Cette modélisation sera ensuite utilisée pour établir une conductivité thermique équivalente de ces combustibles à l'aide du solveur TM-FFT (C++, interface PYTHON).

Les conductivités ainsi calculées seront comparées aux mesures réalisées dans le cadre du projet européen ESFR-SIMPLE.

Une analyse des écarts sera proposée avec des analogies avec d'autres matériaux céramiques dans des domaines hors nucléaire.



- Lieu :

CEA - Centre de Cadarache
13108 Saint Paul Lez Durance
(accessible par bus entreprise)

- Formation souhaitée :

Bac +5 en matériaux

Master / École d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

PLEIADES-GERMINAL (comportement des combustibles de Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR));

Language utilisé : PYTHON

- Mots clés :

Simulation ; Réacteur à Neutrons Rapides (RNR) ; MOX ; Thermique ; Homogénéisation ; Porosité ; Plutonium ; Plateforme de Simulation du comportement des combustibles (PLEIADES)

- Possibilité de thèse :

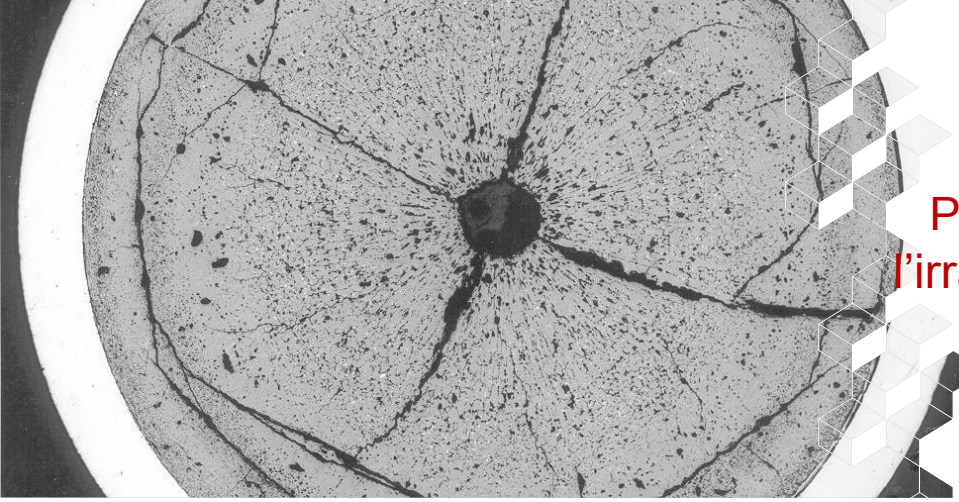
Oui

- Contact :

MARCONI Florian
florian.marconi@cea.fr

Encadrants :

- Florian MARCONI,
- Nathalie CHAUVIN

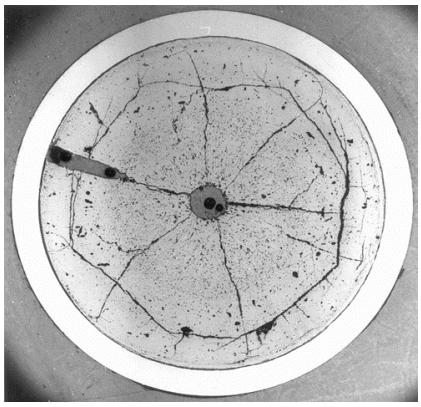


Etude et simulation avec PLEIADES-GERMINAL de l'irradiation de transmutation PHENIX-SUPERFACT.

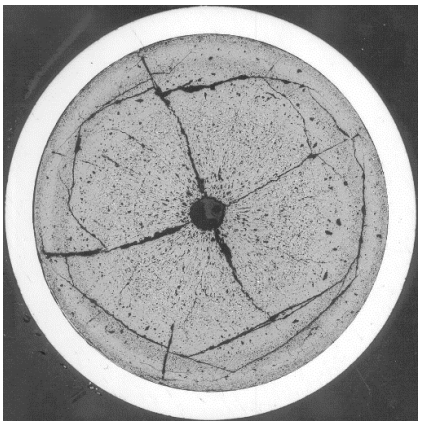
DEC/SESC/LEVA

Le but de ce stage est d'utiliser le code de simulation combustible PLEIADES-GERMINAL pour analyser l'expérience de transmutation SUPERFACT menée dans le réacteur à neutrons rapides PHENIX du CEA. Un des aspects novateurs de cette étude réside dans l'utilisation de conditions d'irradiations mises à jour suite à un nouveau calcul neutronique.

Certains actinides comme l'américium 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 dans le cadre du programme PHENIX-SUPERFACT.



Cette expérience, internationalement reconnue comme la plus représentative sur le thème de la transmutation est notamment utilisée pour qualifier le code de simulation combustible PLEIADES-GERMINAL développé au CEA. Des calculs neutroniques ont récemment été réalisés pour évaluer plus précisément les conditions d'irradiation en utilisant des codes de dernière génération.



Le but du stage proposé ici est donc d'utiliser ces nouvelles données neutroniques pour simuler l'expérience SUPERFACT avec PLEIADES-GERMINAL, en mettant également à jour les conditions thermo-hydrauliques qui en dépendent. Il sera ainsi possible d'améliorer la prédictivité de PLEIADES-GERMINAL, et d'évaluer l'apport de ces données dans la comparaison aux mesures. Une étude de sensibilité vis-à-vis des conditions d'irradiation pourra également être réalisée.

- Lieu :

CEA - Centre de Cadarache
13108 Saint Paul Lez Durance

(accessible par bus entreprise)

- Formation souhaitée :

Bac +4/5 en matériaux

Master / École d'ingénieur

- Durée du stage :

4 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

PLEIADES-GERMINAL (Comportement des combustibles de Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR));

Language utilisé : PYTHON

- Mots clés :

Simulation ; RNR ;
Transmutation ; Actinides ;
Americium ; Plutonium ;
PLEIADES ; GERMINAL ; PHENIX ;
Thermohydraulique

- Possibilité de thèse :

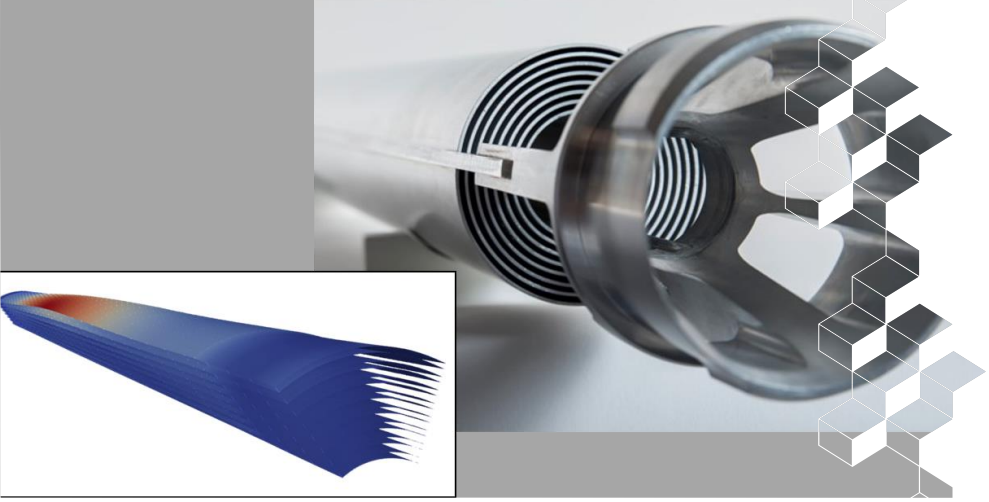
Oui

Encadrants :

- Florian MARCONI,
- Nathalie CHAUVIN

- Contact :

MARCONI Florian
florian.marconi@cea.fr



Simulation mécanique d'un assemblage combustible nucléaire sous sollicitations thermohydrauliques

DEC/SESC/LEVA

La plateforme numérique « PLEIADES » est développée au CEA en collaboration avec EDF et Framatome pour simuler le comportement des combustibles de différentes filières de réacteurs nucléaires. En particulier, le code de calcul PLEIADES/MAIA est dédié aux réacteurs de recherche comme le RJH, et permet de réaliser des simulations en 3D des plaques de combustible.

Contexte et enjeux

Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur nucléaire de recherche en construction sur le centre de Cadarache, consacré principalement à la recherche sur les matériaux et les combustibles pour l'industrie électronucléaire et la production de radio-isotopes pour la médecine nucléaire.

Le CEA mène notamment des activités de R&D sur le combustible nucléaire envisagé pour ce réacteur de recherche, lesquelles associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Dans ce contexte, le Service d'Études et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC) a notamment pour enjeu de reproduire numériquement le comportement en réacteur de l'intégralité d'un assemblage combustible type RJH.

Le stage s'inscrit dans un contexte collaboratif entre la R&D et l'ingénierie du RJH, dans lequel des études sont réalisées en support au futur exploitant du réacteur.

Objectifs du stage

Au sein du Laboratoire d'Expertises et de Validation des Applications combustibles multi-filières (LEVA), le stage aura les objectifs suivants :

- Réaliser des études numériques PLEIADES/MAIA pour différentes configurations thermohydrauliques d'intérêt, en exploitant les simulations CFD réalisées en parallèle dans un autre département à Cadarache (contexte de chaînage/couplage de codes de calcul) ;
- Inversement, étudier la rétroaction des effets thermomécaniques sur la thermohydraulique ;
- Collaborer étroitement avec le service qui réalisera les calculs thermohydrauliques à travers un binômage avec un autre stage dédié

La déroulé du stage nécessitera de :

- Prendre en main les phénomènes en jeu dans les comportements thermomécaniques et thermohydrauliques des plaques de combustible du Réacteur Jules Horowitz, en s'appropriant :
  - Les éléments bibliographiques pertinents pour l'exercice demandé ;
  - Le lancement et l'analyse de calculs PLEIADES/MAIA, avec ses hypothèses, limites et sources d'incertitudes, ainsi que les interdépendances entre modèles physiques couplés ;
- Construire à partir de différents scripts Python préexistants des outils permettant notamment d'exploiter les résultats de simulation thermohydraulique directement dans l'Outil de Calculs Scientifiques PLEIADES/MAIA.

Au cours des travaux, il pourra notamment s'avérer intéressant de :

- S'intéresser aux possibilités de prise en compte des conditions thermohydrauliques considérées directement dans un modèle dédié dans PLEIADES/MAIA, sur la base des calculs CFD ;
- Consolider les analyses en proposant des éléments critiques vis-à-vis des résultats obtenus (études de sensibilité, etc.).

Compétences

- Une expérience en Python, tout particulièrement avec des packages spécialisés en traitement et visualisation de données, serait fortement appréciée.
- Une expérience en simulation thermomécanique, avec des connaissances en mécanique des fluides (thermohydraulique, CFD), serait un plus.

- **Formation souhaitée :**

Ecole d'ingénieur ou Master 2 en Mathématiques Appliquées

Intérêt pour la simulation numérique appliquée à des problèmes multiphysiques

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Python, PLEIADES/MAIA, code CFD, environnement Linux et Windows

- **Mots clés :**

Simulation, Multiphysique, Mécanique, Thermohydraulique, RJH, combustible

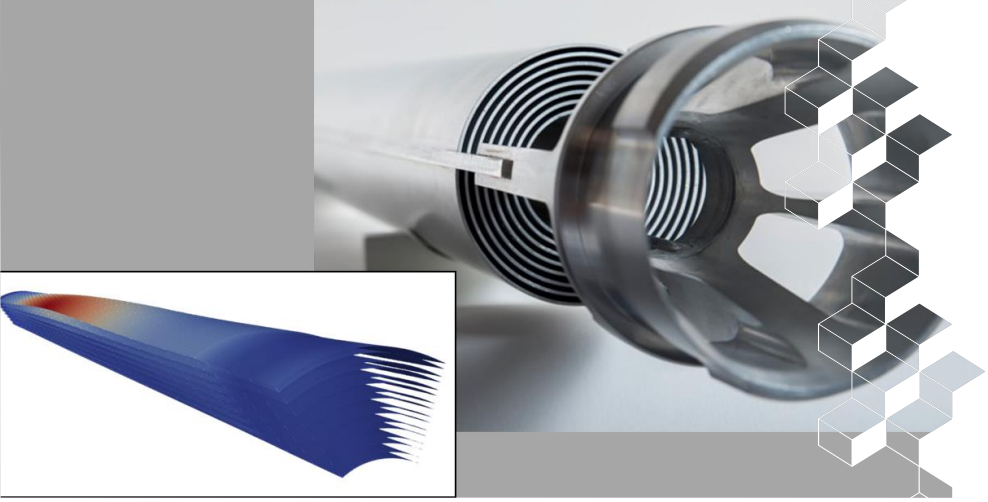
- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

MEYRAND Louis

louis.meyrand@cea.fr



Mechanical simulation of a nuclear fuel assembly under thermohydraulic stresses

DEC/SESC/LEVA

The « PLEIADES » software platform has been developed in collaboration with EDF and Framatome for digital simulation of fuel elements from various reactor technologies. In particular, the PLEIADES/MAIA computation code is dedicated to research reactors such as JHR and enables 3D simulations of fuel plates.

Scope and challenges

The Jules Horowitz Reactor (JHR) is a nuclear research reactor under construction at the Cadarache center, primarily dedicated to research on materials and fuels for the nuclear power industry and the production of radioisotopes for nuclear medicine.

The CEA conducts R&D activities on the nuclear fuel intended for this research reactor, which involve numerical simulation, modeling, and experimentation.

In this context, the Fuel behavior study and simulation Service (SESC) aims to numerically replicate the in-reactor behavior of an entire JRH-type fuel assembly.

The internship is part of a collaborative effort between R&D and JHR's engineering department, in which studies are conducted to support the future operator of the reactor.

Internship objective

Within the Laboratory for Expertise and Validation of Multi-Reactor Fuel Applications (LEVA), the internship will have the following objectives:

- Conduct numerical studies with the PLEIADES/MAIA code for various thermohydraulic configurations of interest, using CFD simulations performed in parallel in another department at Cadarache (context of chaining/coupling calculation codes) ;
- Conversely, study the feedback of thermomechanical effects on thermohydraulics ;
- Work closely with the department that will perform the thermohydraulic calculations, whose data will be used to fulfill the other two objectives, through a pairing with another dedicated internship.

The internship will require:

- Understanding the phenomena involved in the thermomechanical and thermohydraulic behavior of the fuel plates in the Jules Horowitz Reactor, by familiarizing oneself with:
  - The relevant bibliographic data ;
  - Launching and analyzing MAIA calculations, with their assumptions, limitations, and sources of uncertainty, as well as the interdependencies between coupled physical models ;
- Build tools from various pre-existing Python scripts that enable, in particular, the results of thermohydraulic simulations to be used directly in the MAIA code.

The work may include the following points of interest:

- Explore the possibilities of taking the thermohydraulic conditions under consideration directly into MAIA, through a dedicated model based on CFD calculations ;
- Strengthen the analyses by providing critical elements regarding the results obtained (sensitivity studies, etc.).

Skills

- Experience in Python, particularly with packages specializing in data processing and visualization, is highly valued.
- Experience in thermomechanical simulation, with knowledge of fluid mechanics (thermohydraulics, CFD) is also appreciated.

- **Formation souhaitée :**

Master's degree or engineering school, with knowledge in applied mathematics.

Interest in numerical simulation applied to Multiphysics problems

- **Durée du stage :**

6 months

- **Méthode/logiciel(s):**

Python, PLEIADES/MAIA, CFD software(s), Linux and Windows environment

- **Mots clés :**

Simulation, multiphysics, mechanics, thermohydraulics, JHR, nuclear fuel

- **Possibilité de thèse :**

No

- **Contact :**

MEYRAND Louis

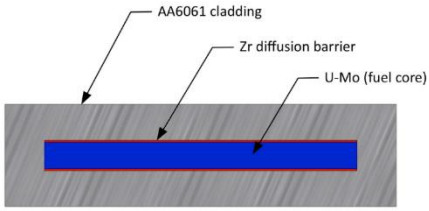
louis.meyrand@cea.fr

Modélisation thermomécanique d'un combustible pour le réacteur expérimental RJH

DEC/SESC/LEVA

DEC/SESC/LDOP

Vue du réacteur expérimental RJH



Coupe d'une plaque de combustible type RJH

L'objectif de ce stage est de simuler le comportement thermomécanique d'une plaque combustible de type RJH incluant la modélisation d'une couche fine entre le combustible nucléaire et sa gaine (barrière de diffusion)

Le stage est proposé au sein de l'institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE), 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.

Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur expérimental en cours de construction sur le site du CEA Cadarache. Il doit permettre de tester le comportement de matériaux et de combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et futurs. Il permettra également de produire des radioéléments à usages médical et industriel.

La plateforme logicielle « PLEIADES » est développée au CEA en collaboration avec différents partenaires industriels et académiques pour simuler le comportement des combustibles des différentes filières de réacteurs nucléaires. Le code de calcul éléments finis PLEIADES/MAIA, dédié aux réacteurs expérimentaux comme le RJH, permet de simuler le comportement en réacteur des plaques et des assemblages combustible.

Le stage se déroulera dans une équipe pluridisciplinaire qui développe, valide et utilise les outils de calcul de la plateforme PLEIADES. Le stagiaire bénéficiera ainsi de la proximité des spécialistes en développement d'outils de calcul scientifique et des spécialistes en étude du comportement des combustibles.

La première partie s'intéressera à la réalisation du maillage de l'élément combustible. Ce maillage sera construit avec le code CEA CAST3M ou avec le mailleur Gmsh, d'abord en 2D puis en 3D.

La deuxième partie du stage consistera en la modélisation de la couche d'interface entre le combustible et la gaine (loi de comportement, interaction avec la gaine et le combustible, …).

Enfin, la dernière partie sera consacrée à la simulation représentative d'une plaque combustible issue d'une irradiation expérimentale, afin d'analyser son comportement sous irradiation (contraintes, déformations, gonflement). Les résultats de ces simulations seront comparés aux mesures issues des expériences.

- Formation souhaitée :

École d'ingénieur ou Master 2 spécialisé en modélisation, calcul scientifique.

- Durée du stage :

5 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Plateforme PLEIADES, CAST3M, Python, C++, Gmsh

- Mots clés :

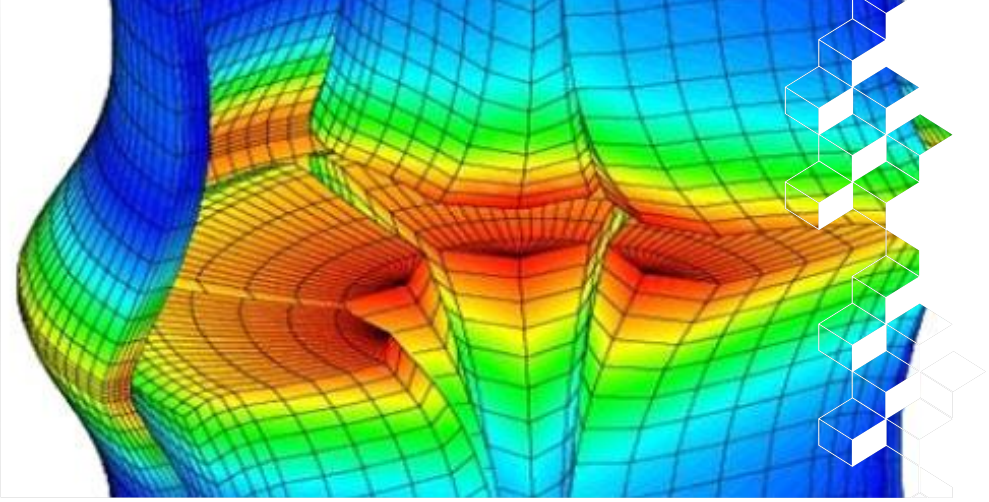
Simulation, Thermomécanique, Combustible nucléaire

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

allan.germain@cea.fr
gentien.marois@cea.fr



Chaînage 1D-3D d'outils de calcul pour l'interprétation d'une irradiation de combustibles en réacteur à neutrons rapides

DEC/SESC/LEVA

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 de multiples situations de fonctionnement et filières de réacteurs. L'objectif du stage est d'adapter un chainage de codes de calcul afin d'interpréter le comportement thermique local de combustibles pour les réacteurs à neutrons rapides.

Selon les outils de calcul, la richesse de la description géométrique et des modèles physiques est différente. Pour certains cas d'étude, il est pertinent d'utiliser des résultats de simulation 1D (disposant de modèles avancés de comportement du combustible et traitant l'élément combustible complet), pour pré-calculer certaines grandeurs essentielles à un calcul thermomécanique 2D ou 3D local, au niveau d'une pastille.

Le travail du stage consistera à adapter pour un code combustible dédié aux Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) des chaînages de simulations développés pour d'autres filières. Dans ce but, le stagiaire suivra la démarche suivante :

- Comprendre la démarche de chaînage d'outils de calcul 1D-3D mise en place pour d'autres applications,

- Pour une problématique donnée sur les combustibles RNR, définir la géométrie, les variables à projeter, les lois matériaux pertinentes, le type de modélisation 2D ou 3D nécessaire,

- Mettre en œuvre ce couplage en pratique, dont la construction des maillages,

- Mettre à profit ces développements pour la réalisation de simulations.

L'application visée est l'interprétation d'une expérience d'irradiation de combustibles réalisée dans le réacteur Phénix.

- Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieurs, avec connaissances en simulation thermomécanique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, outils CEA

- Mots clés :

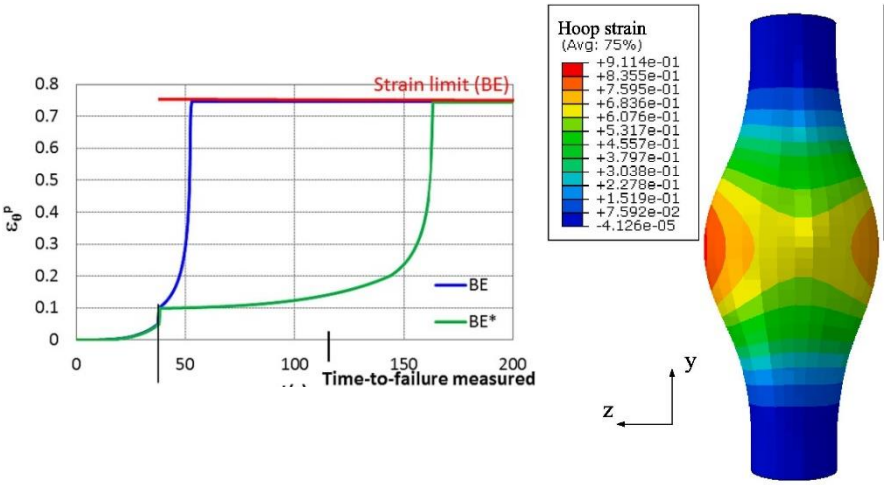
Thermique, mécanique, simulation, combustible

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

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



Identification d'une loi de comportement d'un matériau nucléaire avec incertitudes

DEC/SESC/LEVA

L'objet de ce stage est d'identifier les paramètres numériques d'une loi de comportement mécanique de gaine de combustible nucléaire et leurs incertitudes liées à la dispersion des mesures expérimentales. Cette identification nécessite l'utilisation de méthodes probabilistes.

Les propriétés mécaniques des matériaux nucléaires sont déterminées à partir d'essais dédiés. Des considérations théoriques définissent la forme mathématique de ces lois, et les essais sont utilisés pour caler les paramètres numériques dans ces formulations.

L'objectif de ce stage est d'identifier les paramètres numériques d'une loi de comportement de fluage à haute température de matériau de gainage de combustible nucléaire.

Ce stage présente trois volets :

- Construction d'un outil de simulation numérique des essais mécaniques réalisés au DRMP, basé sur le logiciel MFront (générateur de code dédié aux lois de comportement mécanique développé au CEA [1]).
- Mise en place d'une méthodologie d'identification des paramètres numériques de la loi de comportement (calage, optimisation).
- Identification des paramètres de la loi et de leurs incertitudes liées à la dispersion des essais (probabilités, statistiques).

Ce stage s'inscrit dans la démarche générale de quantification des incertitudes dans les outils de simulation des combustibles nucléaires, les lois de comportement mécanique étant une source d'incertitudes importante identifiée [2].

Encadrants :

- Antoine BOULORÉ (DEC, simulation combustible)
- Ali CHARBAL (DRMP, essais mécaniques)
- Guillaume DAMBLIN (DM2S, calage, incertitudes)

Références :

[1] T. Helfer et al., Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications* 70, 994 (2015).

[2] A. Bouloré, Importance of uncertainty quantification in nuclear fuel behaviour modelling and simulation, *Nucl. Eng. Des.* 355 (2019).

- Formation souhaitée :

M2 en mathématiques appliquées (optimisation, incertitudes) ou en mécanique des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

MFront, Python, R

- Mots clés :

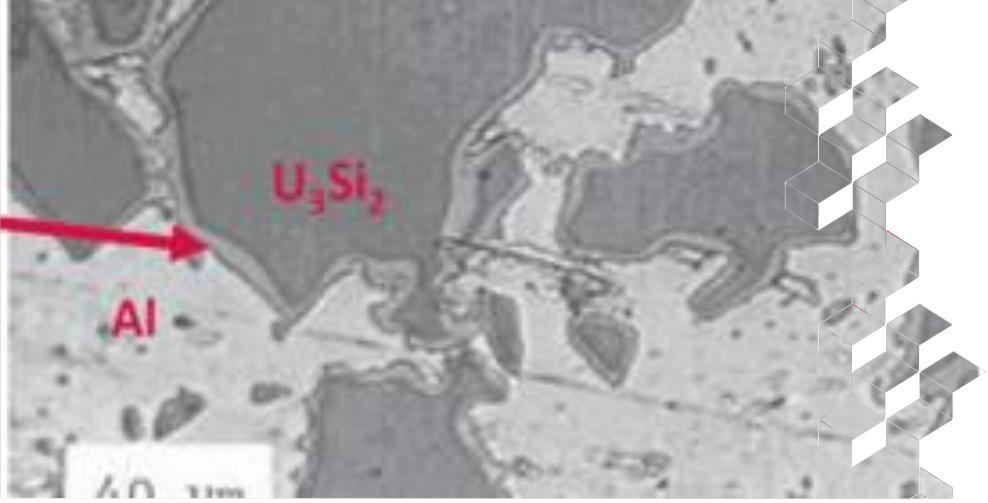
Optimisation, incertitudes, matériaux, simulation

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

BOULORÉ Antoine
antoine.boulore@cea.fr



Modélisation des interfaces U_3Si_2/Al avec des potentiels Machine Learning

DEC/SESC/LM2C

Le combustible uranium-silicium (U_3Si_2) est au cœur de la conception des réacteurs de recherche de nouvelle génération,. Dans ce type de combustible, les particules de U_3Si_2 sont dispersées dans une matrice d'aluminium. Les interactions à l'interface entre ces deux matériaux jouent un rôle clé dans le comportement thermique et mécanique du combustible en fonctionnement. Mieux comprendre et prédire les propriétés de ces interfaces est donc un enjeu majeur pour la sûreté et la performance des réacteurs.

Objectif du stage

Développer et utiliser des outils de simulation avancés pour explorer, à l'échelle atomique, les interfaces entre U_3Si_2 et aluminium. Le cœur de la démarche reposera sur des potentiels interatomiques issus de l'intelligence artificielle, capables de combiner la précision des méthodes quantiques avec la rapidité de la dynamique moléculaire classique.

Missions proposées

Découvrir et tester des potentiels interatomiques basés sur le machine learning pour le système U_3Si_2–Al.

Construire et analyser des modèles d'interfaces entre particules de U_3Si_2 et matrice d'aluminium.

Réaliser des simulations de dynamique moléculaire pour étudier leurs propriétés structurales, mécaniques et thermiques.

Interpréter et visualiser les résultats pour comprendre l'impact des interfaces sur le comportement global du combustible.

Profil recherché

Une première expérience en simulation numérique (dynamique moléculaire, DFT, modélisation matériaux) est un plus, mais la curiosité et la motivation comptent autant.

Intérêt marqué pour l'apprentissage automatique appliqué à la physique et aux matériaux.

Envie d'apprendre, d'explorer des méthodes de modélisation multi-échelle et de contribuer à des recherches concrètes pour l'énergie nucléaire du futur.

Ce que vous apprendrez

Manipuler des méthodes numériques de pointe à l'interface entre mécanique quantique, machine learning et simulations atomistiques.

Développer des compétences valorisables dans le domaine de l'énergie, de la science des matériaux et de la modélisation avancée.

Intégrer une équipe dynamique au CEA Cadarache et participer à la recherche sur les combustibles nucléaires de demain.

- Formation souhaitée :

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

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

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

- Mots clés :

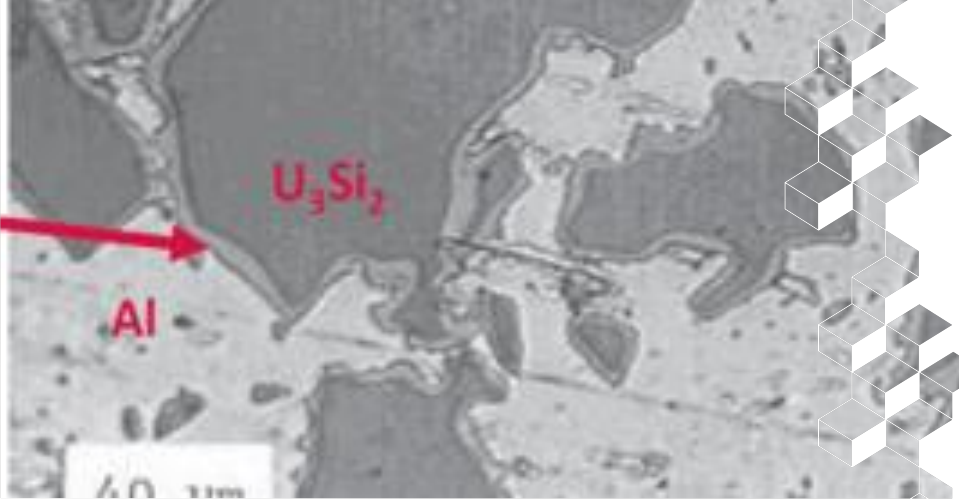
Combustible nucléaire, simulations atomistiques

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

Bouchet Johann
Johann.bouchet@cea.fr



Modeling U_3Si_2/Al Interfaces with Machine Learning Potentials

DEC/SESC/LM2C

The uranium silicium fuel U_3Si_2 is used in research reactors. In these fuels, U_3Si_2 particles are embedded in an aluminum matrix. During operation, interactions at the interface between U_3Si_2 and aluminum strongly influence the thermal and mechanical behavior of the fuel. Understanding and predicting the properties of these interfaces is therefore essential for safe and efficient reactor operation.

Objective:

The goal of this internship is to develop computational tools to simulate the interfaces between U3Si2 and aluminum at the atomic scale. Specifically, the candidate will work with machine learning interatomic potentials, a modern approach that allows simulations of complex materials with the accuracy of quantum mechanics but at a fraction of the computational cost.

Intern Tasks:

• Learn to test machine learning interatomic potentials for the U_3Si_2-Al system.

• Explore ways to model interfaces and interfacial structures between U3Si2 particles and the aluminum matrix.

• Run molecular dynamics simulations to probe structural, mechanical, and thermal properties at these interfaces.

• Analyze and visualize simulation results to understand how the interface affects the overall behavior of the fuel.

Requirements:

• Previous experience in Molecular Dynamics or computational materials science is useful but not strictly required.

• Interest in machine learning applications in physics/materials.

• Motivation to learn and work on multi-scale modeling techniques.

Learning Opportunities:

• Gain hands-on experience with cutting-edge computational methods bridging quantum mechanics, machine learning, and atomistic simulations.

• Develop skills applicable to nuclear materials, energy, and advanced computational materials science.

• Work within a dynamic team at CEA Cadarache, contributing to research on the next generation of nuclear fuels.

- Formation souhaitée :

Master 2 in solid state physics, nuclear engineering.

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

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

- Mots clés :

Nuclear fuels, atomistic simulations

- Possibilité de thèse :

Yes

- Contact :

Bouchet Johann
Johann.bouchet@cea.fr

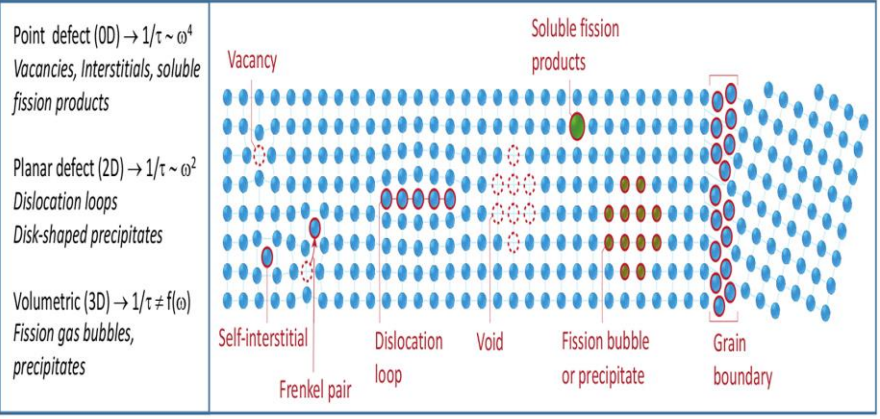


Illustration of irradiation defects found in oxide nuclear fuels.
The phonon scattering rate is sensitive to the dimensionality of the defect.
credits doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00262

Simuler l'impact des défauts d'irradiation sur la conductivité thermique d'un combustible nucléaire

DEC/SESC/LM2C

Durant son irradiation en réacteur, le combustible nucléaire est fortement perturbé. En particulier, les défauts d'irradiation altèrent sa conductivité thermique, propriété dimensionnante pour la sûreté du réacteur. Le but du stage est d'évaluer par diverses méthodes de simulation l'impact de ces défauts.

Lorsqu'un noyau d'uranium se scinde, les deux fragments de fission traversent le matériau combustible à près de **15.000 km/s**, déposant toute leur énergie en quelques picosecondes dans le réseau cristallin. Celui-ci est violemment perturbé avant de retrouver quasiment son état initial - à une exception près: des centaines de milliers d'atomes restent déplacés de leur site. Ces défauts d'irradiation ne sont pas de simples curiosités microscopiques ; ils ont un **impact majeur** sur les propriétés du matériau. En particulier, ils perturbent la propagation des phonons, ces vibrations qui transportent la chaleur, modifiant ainsi la conductivité thermique.

L'objectif de ce stage est de **quantifier l'impact des défauts d'irradiation sur la conductivité thermique de l'UO_2**, le combustible standard utilisé dans les réacteurs nucléaires.

Votre travail s'articulera autour de plusieurs étapes clés :

•**Modéliser les défauts d'irradiation** : avec un code de dynamique d'amas, vous simulerez l'évolution des populations de défauts dans différentes conditions d'irradiation.

•**Relier les défauts au transport thermique** : vous combinerez les concentrations de défauts simulées avec les coefficients de variation de la conductivité, calculés, dans le cadre d'une thèse en cours, par dynamique moléculaire classique et ab initio. Vous enrichirez également ce jeu de données en réalisant des calculs similaires pour les défauts manquants.

•**Développer une compréhension physique** : au-delà des calculs, vous contribuerez à une interprétation à partir des interactions défauts/ phonons.

•**Prédire le comportement du combustible** : enfin, vous simulerez l'évolution de la conductivité thermique dans le combustible réel, soumis à différents historiques de température et de flux neutronique.

Ce projet s'inscrit dans un programme de **physique multi-échelle** de long terme, qui associe simulations à l'échelle atomique, modèles mésoscopiques et études à l'échelle du crayon combustible. L'objectif ultime est de développer des outils prédictifs utiles à la recherche comme à l'industrie nucléaire.

À l'issue du stage, vous aurez non seulement approfondi vos compétences en **science des matériaux, physique de l'irradiation et transport thermique**, mais aussi acquis une expérience concrète de la manière dont **différentes approches de modélisation et les expériences se complètent pour relever des défis industriels réels** dans le domaine de l'énergie nucléaire.

- Formation souhaitée :

Master 2 en physique du solide, physique des matériaux, physique numérique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Dynamique d'Amas (crescendo)

Dynamique moléculaire (lammps)

- Mots clés :

physique matériaux, irradiation, physique statistique, défauts, phonons, dynamique d'amas

- Possibilité de thèse :

oui

- Contact :

Serge MAILLARD
serge.maillard@cea.fr

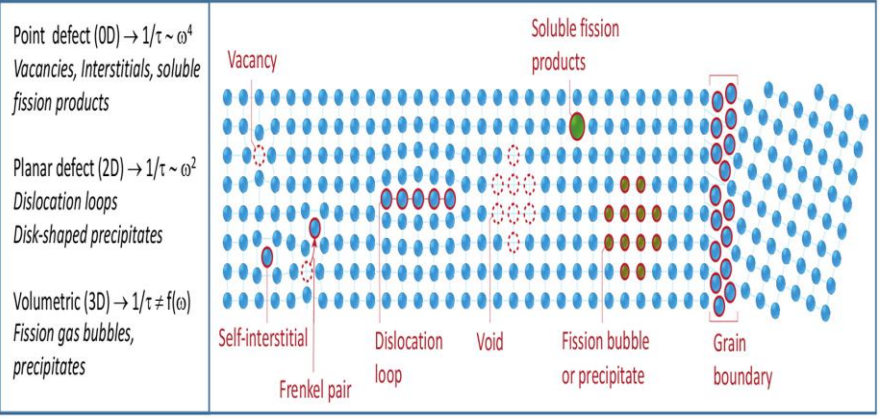


Illustration of irradiation defects found in oxide nuclear fuels.
The phonon scattering rate is sensitive to the dimensionality of the defect.
credits doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00262

Simulating the impact of irradiation defects upon the nuclear fuel thermal conductivity

DEC/SESC/LM2C

During irradiation in a reactor, nuclear fuel undergoes significant perturbations. In particular, irradiation defects alter its thermal conductivity, which is a key factor in determining safety characteristics. The aim of the internship is to evaluate the impact of these defects using various simulation methods.

When a uranium nucleus splits, the two fission fragments race through the fuel material at nearly 15,000 km/s, releasing all their energy in just a few picoseconds. The crystal lattice is shaken violently before almost returning to its initial state—except for one crucial detail: hundreds of thousands of atoms remain displaced from their sites. These irradiation defects are not just microscopic curiosities; they have a profound impact on the material's properties. Most importantly, they disrupt the propagation of phonons, the vibrations that carry heat, thereby altering thermal conductivity.

The goal of this internship is to **quantify the impact of irradiation defects on the thermal conductivity of UO_2**, the standard fuel used in nuclear reactors.

Your work will involve several key steps:

•**Quantify irradiation defects**: Using a cluster dynamics code (Skorek thesis), you will simulate the evolution of defect populations under different irradiation conditions.

•**Linking defects to heat transport**: You will combine the simulated defect concentrations with conductivity variation coefficients, some of which are being calculated as part of an ongoing PhD project using classical and ab initio molecular dynamics. You will also extend this dataset by performing similar simulations for missing defect types.

•**Developing physical insight**: Beyond raw calculations, you will contribute to a theoretical understanding of how defects interact with phonons and reduce heat transport.

•**Predicting fuel behavior**: Finally, you will simulate how thermal conductivity evolves in real fuel under various temperature and flux histories.

This project is part of a long-term, **multi-scale physics program** that brings together atomic-scale simulations, mesoscale models, and fuel rod-level studies. The ultimate aim is to develop predictive tools that can guide both research and industrial applications in nuclear energy.

By the end of this internship, you will not only have deepened your expertise in **materials science, irradiation physics, and heat transport**, but also gained first-hand experience in how **different modeling techniques and experiments come together to solve real-world challenges** in nuclear technology.

- Formation souhaitée :

Master 2 in solid state physics, materials physics, computational physics

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

Cluster dynamics (crescendo)
Molecular dynamics (lammps)

- Mots clés :

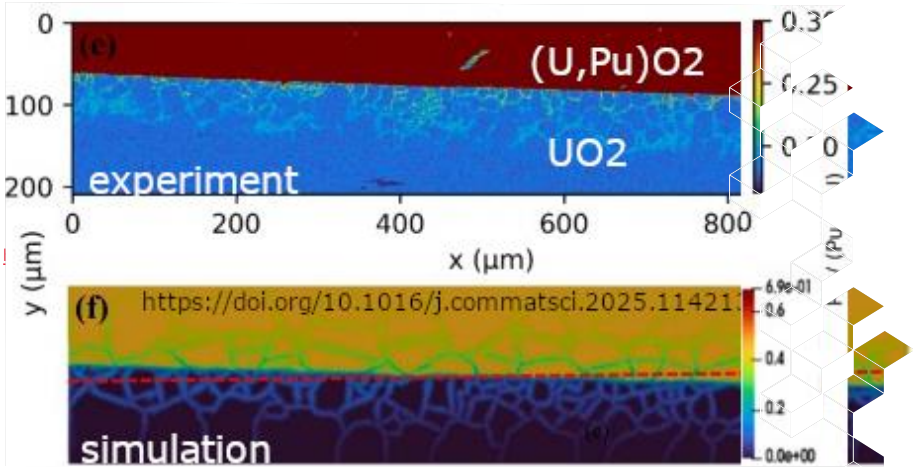
materials physics, irradiation, statistical physics, defects, phonons, cluster dynamics

- Possibilité de thèse :

yes

- Contact :

Serge MAILLARD
serge.maillard@cea.fr



Modélisation de la diffusion aux joints de grains : équations aux dérivées partielles fractionnaires

DEC/SESC/LM2C

Ce stage a pour but d'introduire l'utilisation des équations aux dérivées partielles fractionnaires dans la simulation de la diffusion couplée volume/joints de grains.

Les combustibles utilisés dans les centrales nucléaires sont des céramiques, dont le frittage en phase solide est une étape-clé de la fabrication. En effet, les caractéristiques microstructurales du combustible et son intégrité dépendent de cette étape qui se situe à la fin du procédé.

Lorsque le combustible concerné est l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium ($(U,Pu)O_2$) en conditions de pression partielle de O_2 suffisamment basses, le plutonium (Pu) diffuse rapidement le long des joints de grains de UO_2 et de là plus lentement vers le volume des grains. Ainsi, la répartition de Pu résulte de la conjonction de ces deux phénomènes relevant de lois de Fick aux joints de grains et en volume.

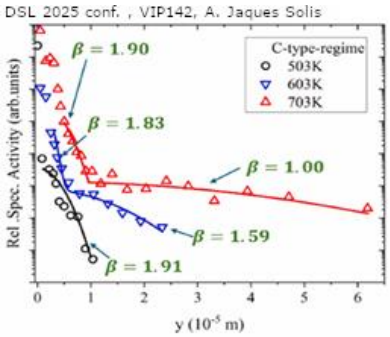
Le but du stage est d'étudier, via une étude analytique et numérique si des simulations numériques correspondant à la résolution des équations aux dérivées partielles fractionnaires ne pourraient pas conduire plus efficacement du point de vue numérique à la répartition du Pu dans l'oxyde mixte $(U,Pu)O_2$ lors de l'interdiffusion de U et de Pu.

Pour ce faire, le stagiaire commencera par une étude bibliographique sur l'utilisation des équations aux dérivées partielles fractionnaires dans la modélisation de la diffusion aux joints de grains [1] ainsi qu'à leur résolution numérique [2,3]. Une comparaison de cette approche avec les simulations faites au laboratoire par simulation des lois de Fick [4] sera réalisée. On visera en particulier à retrouver le lien entre la taille des domaines où la diffusion n'a pas lieu et le diamètre des grains du matériau simulé. Suivant l'avancement du stage, il pourrait être étudié la possibilité de faire évoluer (grossir) la taille de ces domaines au cours du temps.

Au cours du stage, l'étudiant sera accueilli au sein du Service d'Etudes et de Simulation du Comportement des combustibles (SESC) et sera à l'interface entre le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C) et le Laboratoire de Développement des codes combustibles PLEIADES (LDOP). Cette collaboration permet de bénéficier des ressources numériques et de modélisation multiéchelle essentielles dans la mise en place des simulations.

Le candidat devra présenter un goût marqué pour les mathématiques appliquées et les simulations numériques en science des matériaux. Une thèse directement liée au stage n'est pas prévue mais plusieurs thèses sur le frittage sont prévues pour un début en 2026.

$$\frac{\partial^{\alpha} C(x,t)}{\partial t^{\alpha}} = D_{\beta} \frac{\partial^{\beta} C(x,t)}{\partial |x|^{\beta}}$$



Effet du pramètre β sur l'activité de l'espèce chimique modélisé par la méthode des équations aux dérivées partielles fractionnaires [1]

Références

[1] Aldonza Jaques Solis, Sergiy Divinski, Non-Fickian transport in grain boundaries: evidence for fractional diffusion, invited talk VIP142, Conférence Diffusion in Solids and Liquids 2025, Naples 23-27 juin 2025.

[2] Alain Cartalade, Modèles à champ de phase et équations fractionnaires simulés par méthodes de Boltzmann sur réseaux, https://theses.hal.science/tel-04548517v1 .

[3] Jing-Rebecca Li, Modeling and simulation of diffusion, https://theses.hal.science/tel-00925028v1.

[4] Ahmed Ouhammou, Jaques Léchelle, Florent Lebreton et al., « Three-dimensional modeling of diffusion in bulk and grain boundaries: application to (U, Pu)O_2 system », Computational Materials Science, Volume 259, 2025, 114213, https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114213

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 en mathématiques appliquées ou science des matériaux ou génie mécanique/civil.

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Résolution d'équations aux dérivées partielles fractionnaires

- Mots clés :

Frittage, diffusion, space fractional diffusion equation

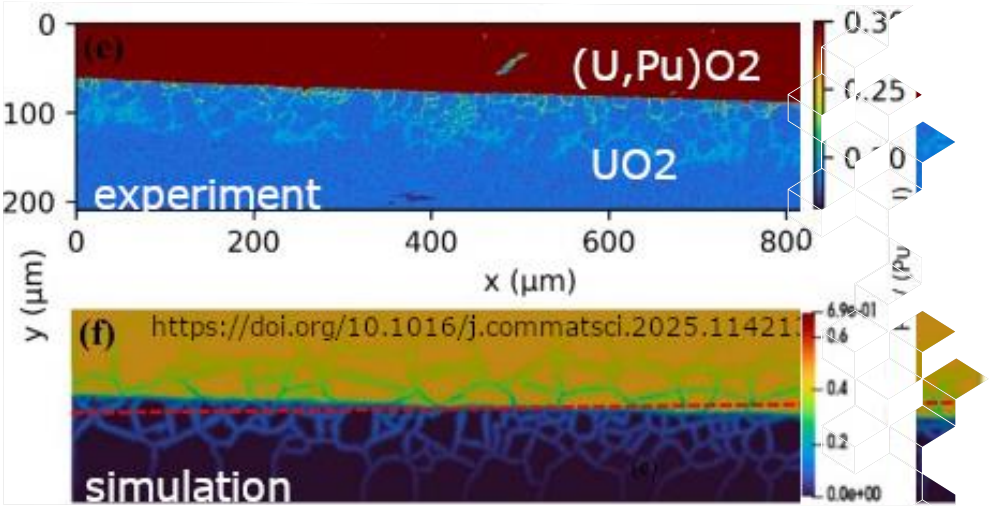
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Léchelle Jacques
jacques.lechelle@cea.fr

Socié Adrien
adrien.socie@cea.fr



Modeling grain boundary diffusion with fractional partial differential equations

DEC/SESC/LM2C

The aim of this internship is to introduce the use of fractional partial differential equations in the simulation of coupled volume/grain boundary diffusions.

Fuels used in nuclear power plants are ceramics, and solid-phase sintering is a key step in their manufacturing process. Indeed, the microstructural features of the fuel and its integrity rely on this step, which occurs at the end of the fabrication process.

As the fuel is made of mixed uranium and plutonium oxides ($(U,Pu)O_2$) under conditions of sufficiently low O_2 partial pressure, plutonium (Pu) diffuses swiftly along UO_2 grain boundaries and from there more slowly towards the grain bulk. Thus, the distribution of Pu results from the conjunction of these two phenomena falling under Fick's laws at grain boundaries and in volume.

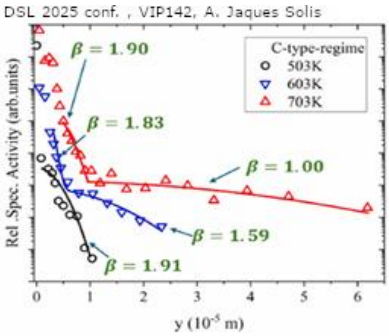
The aim of the internship is to study, via an analytical and numerical study, whether numerical simulations corresponding to the resolution of fractional partial differential equations could not lead more efficiently from a numerical point of view to the distribution of Pu in the mixed oxide $(U,Pu)O_2$ during the interdiffusion of U and Pu than coupled grain boundary and bulk Fick's laws.

To this aim, the intern will begin with a bibliographic study on the use of fractional partial differential equations in the modeling of diffusion at grain boundaries [1] as well as their numerical resolution [2,3]. A comparison of this approach will be carried out with simulations made in the laboratory by simulation of Fick's laws [4]. We will aim more particularly to find the link between the size of the domains where diffusion does not take place and the diameter of the grains of the simulated material. Depending on the progress of the internship, the possibility of changing (increasing) the size of these domains over time in a simulation could be studied.

During the internship, the student will be hosted by the Fuel Behavior Study and Simulation Department (SESC) and will be at the interface between the Fuel Behavior Modeling Laboratory (LM2C) and the PLEIADES Fuel OCS Development Laboratory (LDOP). This collaboration provides access to essential digital and multiscale modeling resources for setting up simulations.

The candidate should have a strong interest in applied mathematics and numerical simulations in materials science. A thesis directly related to the internship is not planned, but several theses on sintering are planned in the Department for a start in 2026.

$$\frac{\partial^{\alpha} C(x,t)}{\partial t^{\alpha}} = D_{\beta} \frac{\partial^{\beta} C(x,t)}{\partial |x|^{\beta}}$$



Effect of parameter β on the activity of the chemical species modeled by the method of fractional partial differential equations [1]

Références

[1] Aldonza Jaques Solis, Sergiy Divinski, Non-Fickian transport in grain boundaries: evidence for fractional diffusion, invited talk VIP142, Diffusion in Solids and Liquids 2025 Conference, Naples 23-27 juin 2025.
[2] Alain Cartalade, Modèles à champ de phase et équations fractionnaires simulés par méthodes de Boltzmann sur réseaux, https://theses.hal.science/tel-04548517v1 .
[3] Jing-Rebecca Li, Modeling and simulation of diffusion, https://theses.hal.science/tel-00925028v1.
[4] Ahmed Ouhammou, Jaques Léchelle, Florent Lebreton et al., « Three-dimensional modeling of diffusion in bulk and grain boundaries: application to (U, Pu)O_2 system », Computational Materials Science, Volume 259, 2025, 114213, https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114213

- Formation souhaitée :

Engineering school or Master 2 in applied mathematics or materials science or mechanical/civil engineering.

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

Solving fractional partial differential equations

- Mots clés :

sintering, diffusion, space fractional diffusion equations

- Possibilité de thèse :

no

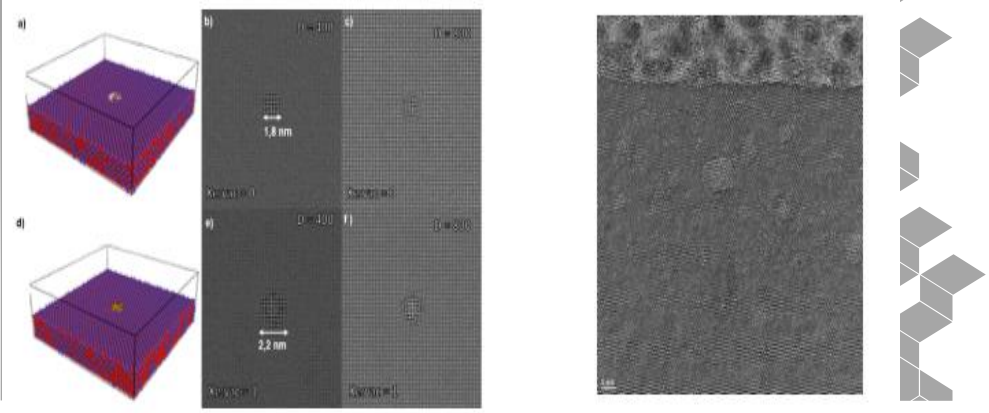
- Contact :

Léchelle Jacques
jacques.lechelle@cea.fr

Socié Adrien
adrien.socie@cea.fr

Amélioration de l'analyse d'images MET de défauts étendus dans l'UO_2 par dynamique moléculaire classique

DEC/SESC/LM2C



On the left, numerical' TEM images, displaying a xenon bubble generated with classical molecular dynamics. On the right, an 'experimental' TEM image showing a population of xenon bubbles implanted in UO_2 (courtesy of C. Sabathier and C. Onofri, from CEA Cadarache).

Le dioxyde d'uranium UO_2, mis sous la forme de pastilles frittées, constitue le combustible nucléaire le plus couramment utilisé. Au cours de leur temps de vie en réacteur, ces pastilles d'UO_2 sont soumises à d'intenses conditions d'irradiation, de gradients thermiques, ainsi qu'à des contraintes chimiques et mécaniques, combinées à l'accumulation de produits de fission (PF) tels le xénon. L'accumulation de ces défauts et PFs a un fort impact sur les propriétés thermophysiques du combustible et influencent les scénarios de sûreté nucléaire. Améliorer notre compréhension et des processus de stabilité et d'agglomération associés à ces défauts est donc fondamental. Dans ce cadre, les mesures expérimentales réalisées avec la microscopie électronique à transmission (MET) permettent de générer des cartes détaillées de défauts nanométriques au sein des combustibles, telles que des bulles contenant du Xe. Cependant, la mesure de la densité ou de la pression de Xe au sein de ces bulles reste difficile sur la base de ces seules mesures expérimentales. Dans ce travail, nous vous proposons d'utiliser des simulations de dynamique moléculaire classique pour aider à la caractérisation de ces images et améliorer la précision des résultats associés.

Objectifs : L'objectif de ce stage est de contribuer à la caractérisation d'images MET (Microscopie Électronique en Transmission) de défauts étendus dans l'UO_2, typiquement des bulles de Xe. Vous utiliserez un potentiel interatomique basé sur l'apprentissage automatique développé au laboratoire pour effectuer des simulations de dynamique moléculaire classique de bulles dans l'UO_2. Une fois ces simulations réalisées, vous utiliserez un second outil de simulation afin de générer des images MET correspondant aux résultats de la simulation atomistique. Cela vous permettra de comparer directement les images MET produites numériquement avec celles obtenues expérimentalement et d'aider à caractériser les images expérimentales.

Etapes : Bibliographie, familiarisation avec les outils de calcul (environnement Linux, codes pour les simulations atomistiques, supercalculateurs du CEA), comparaison entre les résultats de simulation obtenus et les images MET existantes.

Contexte : Le stage se déroule dans un laboratoire de recherche spécialisé dans la simulation multi-échelle des combustibles nucléaires, au centre de recherche de Cadarache. Le stagiaire travaillera en étroite collaboration avec des doctorants du laboratoire, ainsi qu'avec des chercheurs d'autres services du CEA.

- Formation souhaitée :

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

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

LAMMPS (dynamique moléculaire), VASP/ABINIT (méthodes ab initio), AbTEM (TEM)

- Mots clés :

Combustible nucléaire, calculs atomistiques

- Possibilité de thèse :

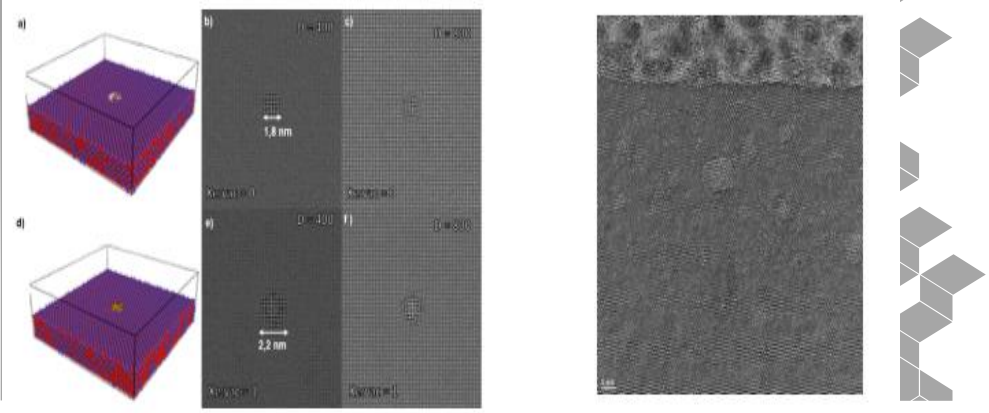
Non

- Contact :

Julien Tranchida
julien.tranchida@cea.fr

Enhancing TEM Image Analysis of UO_2 Defects through Classical Molecular Dynamics

DEC/SESC/LM2C



On the left, numerical' TEM images, displaying a xenon bubble generated with classical molecular dynamics. On the right, an 'experimental' TEM image showing a population of xenon bubbles implanted in UO_2 (courtesy of C. Sabathier and C. Onofri, from CEA Cadarache).

Sintered pellets of uranium dioxide (UO_2) are the most commonly used nuclear fuel in the world. During their life in a reactor, these pellets are subjected to intense conditions of irradiation, temperature gradients, and chemical and mechanical stress, combined with the accumulation of fission products (FPs) such as Xe. The presence and accumulation of these defects and FPs impact the properties of the fuel (for example, its thermal conductivity) and influence nuclear safety scenarios. Improving our understanding of the stability and agglomeration processes associated with these defects is therefore of fundamental importance. Experimental measurements performed with Transmission Electron Microscopy (TEM) allow for the generation of detailed maps of nanometric defects within irradiated fuels, such as images of bubbles filled with Xe. However, measuring the Xe density or pressure within these bubbles remains challenging based solely on these experimental measurements. In this work, we propose using classical molecular dynamics simulations to aid in the characterization of these images and improve the accuracy of the associated results

Objectives : The objective of this internship is to contribute to the characterization of TEM images of extended defects in UO_2, typically Xe nanobubbles. You will use a machine-learning interatomic potential developed at the laboratory to perform classical molecular dynamics simulations of realistic bubbles (in terms of size and Xe density) in UO_2. Once these simulations are performed, you will use a second simulation tool to generate TEM images corresponding to the results of the atomistic simulation. This will allow you to directly compare the numerically produced TEM images with the experimental ones and help characterize the experimental images based on these comparisons.

Steps: Bibliography, familiarization with the computational tools (Linux environment, LAMMPS and ABINIT codes for the atomistic simulations, AbTEM for the TEM images geeration, CEA supercomputers), understanding of the machine-learning interatomic potential for UO_2 as well as its application for classical molecular dynamics calculations, comparison between the obtained simulation results and the existing TEM images.

Context and collaborations: The internship is hosted in a very dynamic research laboratory specialized in the multiscale simulation of nuclear fuels, on the Cadarache research center. The intern will work in close collaboration with PhD. students at the laboratory, as well as with researchers from other CEA services.

- Formation souhaitée :

Master 2 in solid state physics, nuclear engineering.

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

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

- Mots clés :

Nuclear fuels, atomistic simulations.

- Possibilité de thèse :

No

- Contact :

Julien Tranchida
julien.tranchida@cea.fr

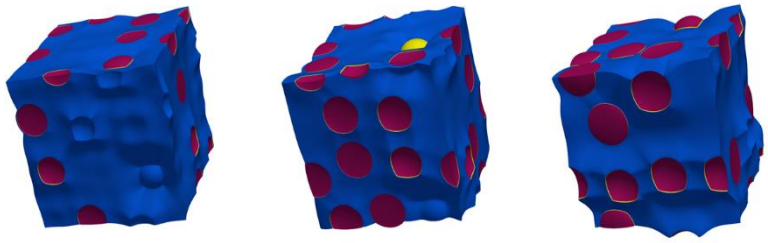


Figure. *Exemples de microstructures particulaires périodiques générées numériquement grâce à l'algorithme RSA*

Modélisation micromécanique du comportement de matériaux composites aux interfaces imparfaites : application au combustible UO_2 irradié

DEC/SESC/LMCP

Ce stage a pour objectif d'analyser les propriétés thermomécaniques du combustible UO_2, utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée, en présence de défauts microscopiques. Celui-ci s'intéresse aux phénomènes de décohésion intergranulaire, observés à différents stades d'évolution du combustible, notamment en amont de l'initiation et de la propagation de fissures. Cette étude vise à clarifier l'impact de la décohésion sur les propriétés locales et macroscopiques de l'UO_2 au cours de son irradiation. La décohésion sera modélisée localement à l'aide de modèles d'interfaces imparfaites, assurant la continuité de la traction, mais autorisant un saut de déplacement à l'interface. Ce choix permettra le développement de modèles, analytiques et numériques, en mesure de décrire le comportement du combustible à haute température, en situations incidentelles et accidentelles.

Contexte :

Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire, que ce soit en zone saine ou en zone restructurée, la surpression de bulles de gaz, situées aux joints de grains, constitue un des mécanismes principaux à l'origine de la décohésion intergranulaire à l'échelle de la microstructure. Sous l'effet de l'irradiation neutronique, les produits de fission migrent préférentiellement vers les joints de grains, entrainés par des mécanisme de diffusion et de transport. L'accumulation de produits de fission conduit à une augmentation locale de la pression, susceptible de provoquer une décohésion progressive aux joints de grains, endommageant ainsi le combustible. L'influence des effets de décohésion sur les propriétés de l'UO_2 demeure une question encore ouverte. En effet, la considération de décohésion partielle ou totale ne s'inscrit pas dans le cadre classique de la théorie de l'homogénéisation. La microstructure du combustible UO_2 peut, de manière simplifiée, être approchée comme une microstructure de type matrice-inclusion. Une stratégie couramment utilisée en élasticité linéaire consiste à recourir à l'approximation de Ponte Castañeda et Willis [1], ainsi qu'au concept d'inclusion équivalente développé par Hashin [2], pour estimer les propriétés effectives de matériaux composites à renforts aux interfaces imparfaites. Cette approche repose sur l'idée de remplacer les propriétés élastiques de la phase renforçante par des propriétés équivalentes modifiées, incorporant les propriétés élastiques moyennées de l'interface.

Objectifs :

L'objectif de ce stage est de développer des modèles analytiques permettant d'estimer les propriétés effectives de matériaux composites particulaires aux interfaces imparfaites. Les estimations obtenues seront confrontées à certains résultats de la littérature, ainsi qu'à des simulations numériques en champ complet, basées sur l'utilisation de transformées de Fourier rapides (FFT).

Déroulement du stage :

- Étude bibliographique sur les propriétés du combustible UO_2 et sur la modélisation théorique et numérique de milieux hétérogènes aux interfaces imparfaites;
- Développement et implémentation de modèles analytiques de type Hashin-Shtrikman. Mise en place de calculs FFT en champ complet;
- Vérification et validation des outils développés.

Collaborations potentielles :

- Prof. IDIART Martin I. (Université Nationale de La Plata, Argentine)
- Dr. LEBENSOHN Ricardo A. (Laboratoire National de Los Alamos, États-Unis)

Références :

[1] Ponte Castañeda & Willis : J. Mech. Phys. Solids 43, 1919–1951 (1996).

[2] Hashin : Mech. Mater. 8, 333–348 (1990).

- Formation souhaitée :

Master 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur, avec une spécialisation en mécanique numérique ou mécanique des matériaux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Mécanique des milieux continus - Méthodes FFT - Fortran 90 - Python

- Mots clés :

Composites - Homogénéisation - Calculs en champ complet - Interfaces imparfaites

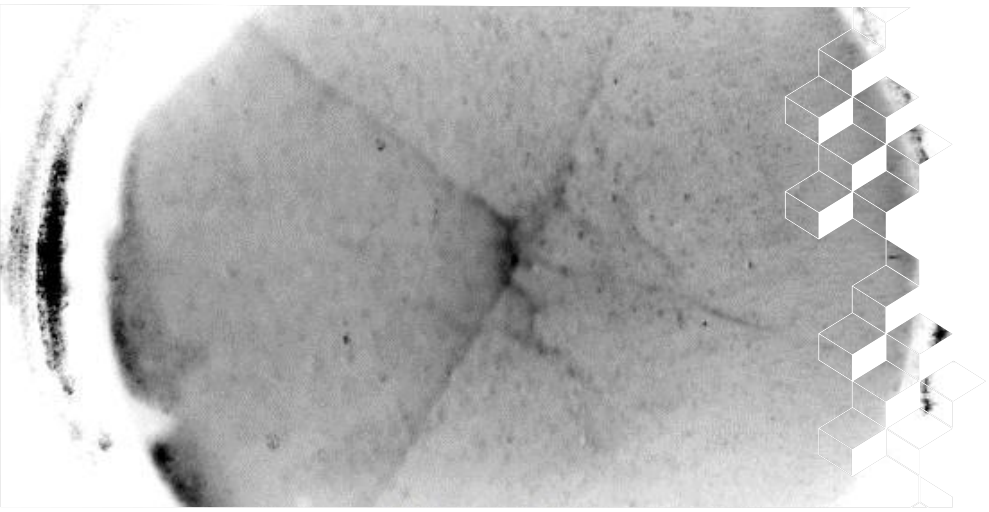
- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

renaud.masson@cea.fr

valentin.gallican@cea.fr



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

DEC/SESC/LMCP

Ce stage se propose de décrire la fissuration du combustible nucléaire au cours d'essais de chauffe laser par éléments finis en utilisant des modèles d'endommagement à gradient et de comparer résultats numériques et expérimentaux

Le dioxyde d'uranium est une céramique qui sert de combustible aux 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 fragile et les pastilles de combustible se fissurent lors de la première montée en puissance du réacteur et lors de différentes situations de fonctionnement, avec une influence importante sur le comportement thermomécanique des éléments combustible. La compréhension de ce phénomène et sa représentation dans les simulations numériques est une thématique importante.

Dans le cadre du doctorat d'Hugo Fuentes réalisé au CEA (IRESNE DES/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 réacteur. 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/LSC) [2] en tenant compte des données expérimentales disponibles:

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

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 the Conference 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, 2025

- Formation souhaitée :

Master II en mécanique non linéaire du solide

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Manta ou MFEM/MGIS

- Mots clés :

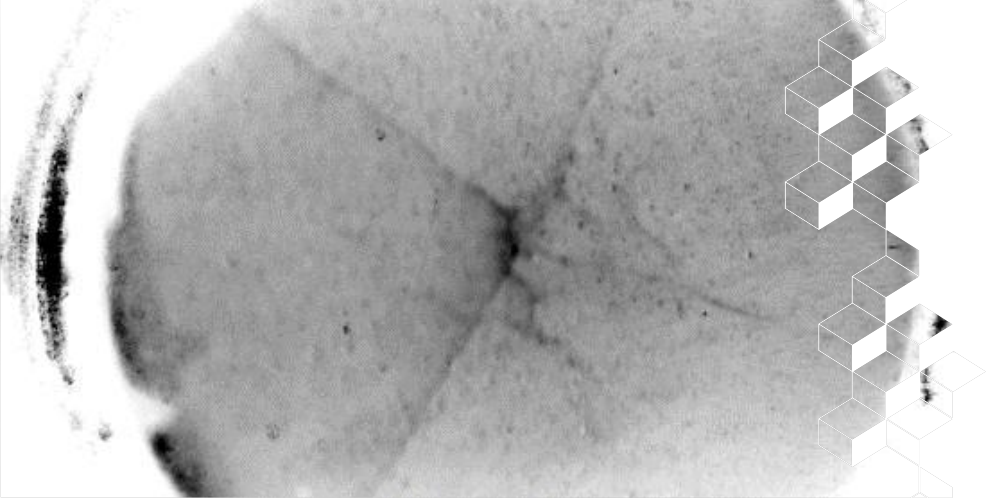
Fissuration - Simulation E.F. – calculs hautes performances

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

Helfer Thomas
thomas.helfer@cea.fr



Numerical analysis of uranium dioxide fracture tests induced by laser heating

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, and to compare numerical and experimental results

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 brittle, and the fuel pellets crack during the initial power-up of the reactor and during various operating conditions that have a significant influence on the thermo-mechanical behavior of the fuel elements. Understanding this phenomenon and representing it in numerical simulations developed at CEA is thus an important topic.

As part of Hugo Fuentes' PhD at the CEA (IRESNE DES/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 (IRESNE DES/DEC/SESC/LSC) [2], taking into account the available experimental data:

-films showing the evolution of cracks

-measured thermal maps.

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

- Formation souhaitée :

Master II in nonlinear computation mechanics

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

FEM/Manta or MFEM/MGIS

- Mots clés :

Fracture, gradient damage models

- Possibilité de thèse :

Yes

- Contact :

Thomas Helfer

thomas.helfer@cea.fr

Développement d'une approche monolithique HPC pour la simulation thermomécanique du comportement des combustibles nucléaires

DEC/SESC/LMCP

Le stage se déroulera à l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires du CEA Cadarache, dont les travaux contribuent à la conception de solutions énergétiques bas carbone. L'institut mène notamment des activités de R&D sur la simulation du comportement des combustibles nucléaires, qui nécessitent de traiter des couplages thermomécaniques.

La simulation numérique du comportement des combustibles nucléaires repose sur la modélisation des interactions thermomécaniques qui s'établissent en cœur de réacteur. Les gradients thermiques générés par la fission induisent des contraintes mécaniques susceptibles de provoquer déformations et endommagements du combustible. La maîtrise de ces phénomènes fortement couplés constitue un enjeu majeur pour l'optimisation de la sûreté et des performances des réacteurs nucléaires.

La résolution numérique de ces problèmes multiphysiques repose principalement sur deux stratégies :

- l'approche **monolithique**, qui consiste à résoudre simultanément l'ensemble des équations dans un système global.
- l'approche **partitionnée** qui repose sur l'utilisation de solveurs spécifiques dédiés à chaque domaine physique, avec un échange des grandeurs d'intérêt.

La plateforme de simulation du comportement des combustibles nucléaires PLEIADES [1], développée par le CEA en partenariat avec EDF et Framatome, repose actuellement sur une approche partitionnée combinée à des méthodes d'accélération de convergence. Cette plateforme est en train d'évoluer vers des calculs HPC. Dans ce cadre, des études préliminaires de scalabilité des différentes stratégies numériques de couplage sont d'intérêt.

L'objectif du stage est de développer une approche **monolithique HPC** pour la résolution de problèmes thermomécaniques en s'appuyant sur ***MFEM*** [2], une bibliothèque C++ open-source permettant la résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis.

Dans un premier temps, l'étudiant(e) prendra en main la bibliothèque *MFEM* en s'appuyant sur la documentation et les exemples disponibles.

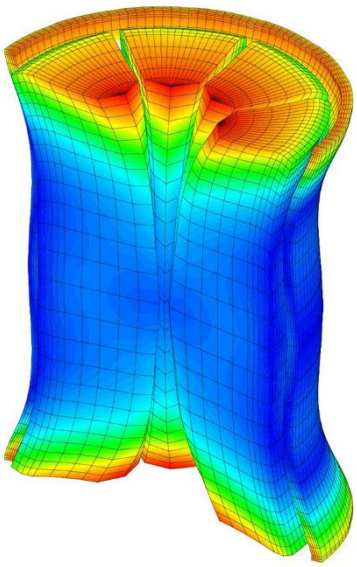
Dans un second temps, il/elle implémentera l'approche monolithique pour la résolution d'un problème thermomécanique HPC en utilisant *MFEM*. Une stratégie d'implémentation par bloc, déjà proposée par *MFEM*, sera privilégiée.

Enfin, l'approche proposée sera éprouvée au travers d'une étude qui comprendra :

- des tests de convergence;
- L'évaluation de différents préconditionneurs afin d'optimiser les temps de calcul ;
- Une analyse de la scalabilité de la méthode sur supercalculateur ;
- La validation des résultats par comparaison avec des solutions analytiques ou des benchmarks numériques.

[1] S. Bernaud, I. Ramière, G. Latu, B. Michel, *PLEIADES: A numerical framework dedicated to the multiphysics and multiscale nuclear fuel behavior simulation* , 2024.

[2] Robert Anderson et al., *MFEM : A modular finite element methods library*, 2021, https://mfem.org/



- Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées et/ou Calcul Haute Performance

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Méthode des éléments finis, MPI, MFEM, C++, Linux

- Mots clés :

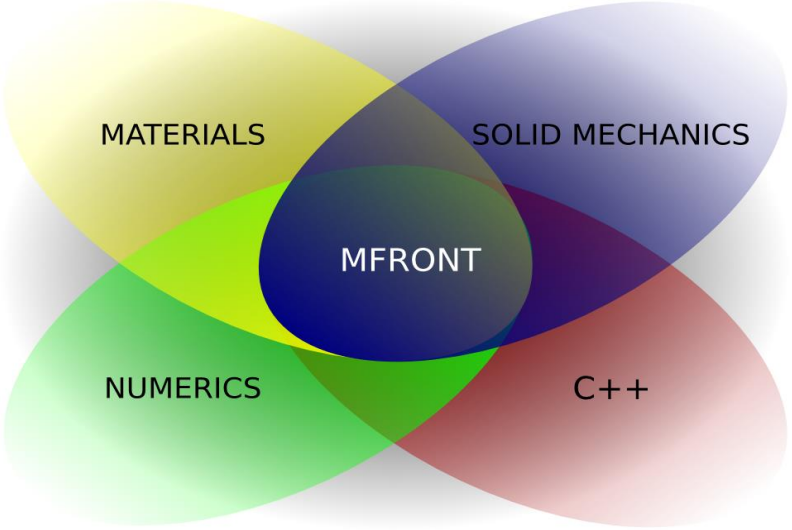
Thermomécanique, éléments finis, monolithique, HPC, couplage, méthodes numériques

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

Isabelle RAMIERE
isabelle.ramiere@cea.fr
Pierre DUBOIS
pierre.dubois@cea.fr



Investigation d'un code aux éléments finis RATEL sur GPU et extension aux lois de comportements générés par MFront

- DEC/SESC/LEVA

L'objet de ce stage est d'abord d'évaluer les performances du code aux éléments finis RATEL, dédié à la mécanique du solide, sur carte graphique pour différents cas tests d'intérêt pour les applications combustible.

Le couplage de RATEL et du générateur de code MFront, dédié aux lois de comportement mécanique, sera développé dans un second temps.

La modélisation par la méthode des éléments finis des phénomènes thermomécaniques a une place centrale dans les simulations d'éléments combustible développées au sein de la plateforme PLEIADES. Cette plateforme se base sur le projet MFront pour implémenter les lois de comportement mécanique d'intérêt [2]

Afin de pouvoir mener des simulations plus complexes, en terme de finesse de discrétisation ou de description physique, cette plateforme se tourne vers des solveurs hautes performances, notamment basés sur l'utilisation efficace d'accélérateurs de type cartes graphiques (GPU).

L'utilisation des cartes graphiques pour les problèmes de mécanique du solide non-linéaire est cependant encore balbutiante et est un domaine de recherche actif.

Le code aux éléments finis RATEL [1], basé sur la librairie libCEED promet des perspectives intéressantes en se basant sur :

- des méthodes de résolution de système linéaire matrix-free,
- des éléments finis d'ordre élevés,
- des implémentations optimisées de lois de comportement mécanique non linéaires relativement simples.

L'objet de ce stage est:

- d'éprouver les performances de RATEL sur un ensemble de cas test d'intérêt

- d'intégrer dans RATEL des lois générées par MFront et d'en tester les performances, notamment en comparaison des implémentations natives fournies par RATEL.

Références

[1]Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. Computers & Mathematics with Applications. 2015.

[2] Ratel: Performance portable solid mechanics with libCEED and PETSc. Journal of Open-Source Software. 2025

.

- Formation souhaitée :

Master II en mathématiques appliquées ou en mécanique non linéaire des solides

3ème année d'école d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

RATEL, MFront

- Mots clés :

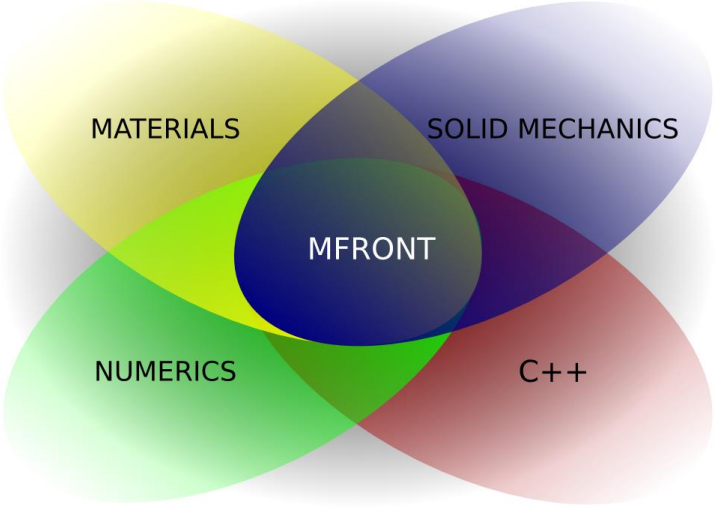
Elements finis, GPU, benchmark, lois de comportement mécaniques, C++

- Possibilité de thèse :

non

- Contacts :

thomas.helfer@cea.fr



Implémentation de lois de comportement mécanique par différentiation automatique

- **L'objet de ce stage est d'évaluer la pertinence de la bibliothèque TFELMathEnzyme, basé sur le projet de différentiation automatique Enzyme, pour l'implémentation de lois de comportement mécanique complexes dans MFront. On s'intéressera à comparer les performances de cette solution à des implémentations existantes en termes de performance et de robustesse.**

Les lois de comportement mécanique concentrent les connaissances acquises sur les matériaux et sont de fait fondamentales en mécanique des structures. Leur rôle est de calculer l'évolution d'un ensemble de variables internes, les contraintes générées et une dérivée, appelée opérateur tangent cohérent.

Ces calculs nécessitent en général d'intégrer un système d'équations différentielles ordinaires sur un pas de temps.

Généralement, une méthode semi-implicite permet de transformer ce système en un système d'équations non-linéaires résolus par une méthode de type Newton, ce qui nécessite de calculer la matrice jacobienne du système par dérivation.

Ainsi, l'intégration d'une loi de comportement nécessite de nombreux calculs de dérivées, ce qui est une étape souvent ingrate, fastidieuse et source de nombreuses erreurs qui peuvent mettre à mal la convergence de l'algorithme ou ses performances numériques.

Le projet MFront est un générateur de code dédié aux lois de comportement mécanique basé sur le langage C++ développé par le CEA, EDF et Framatome [1].

Ce stage s'intéresse à l'utilisation du projet Enzyme qui permet de différencier du code C++ après la phase d'optimisation par le compilateur Clang, offrant des performances remarquables [2].

Une bibliothèque, nommée TFELMathEnzyme, a été développée pour permettre l'utilisation d'Enzyme avec les objets tensoriels de la bibliothèque tensorielle nommée TFEL/Math qui est utilisée par le générateur de code Mfront.

Références

[1] Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. Computers & Mathematics with Applications. 2015.

[2]Reverse-mode automatic differentiation and optimization of GPU kernels via enzyme. SC '21..

- Formation souhaitée :

  Master II en mathématiqus appliquées ou en mécanique non linéaire des solides

  3ème année d'école d'ingénieur

- Durée du stage :

  6 mois

- Méthode/logiciel(s):

  MFront, Manta

- Mots clés :

  Différentiation automatique, Enzyme, C++

- Possibilité de thèse :

  oui

- Contacts :

thomas.helfer@cea.fr

Développement et vérification du code de thermomécanique Manta pour la simulation multiphysique des combustibles nucléaires

DEC/SESC/LMCP

L'objectif du stage est de contribuer à la qualification de MANTA, code de thermomécanique de nouvelle génération développé au CEA. Trois aspects seront abordés : le développement de conditions aux limites spécifiques à la simulation multiphysique des combustibles nucléaires, la qualification unitaire du code et le développement de tests d'intégration des lois de comportement mécanique.

Manta est un code de simulation numérique hautes performances développé au sein du CEA. Il est voué à devenir l'un des piliers de la plateforme de simulation des combustibles nucléaires PLEIADES développée au DEC/SESC.

Pour répondre aux spécificités des simulations multiphysiques du combustible, les objectifs du stage sont :

1. de développer des conditions aux limites thermique et mécanique spécifiques, de les vérifier et de mettre en place une base de tests automatisée sous intégration continue.
2. De disposer d'une base de vérification étendue du code Manta pour les applications aux combustibles nucléaires. Cette base de vérification contiendra des tests de complexité croissante, allant de tests unitaires, pour lesquels des solutions analytiques sont disponibles, à des tests intégraux vérifiés par comparaison à des codes tiers (MTest, Cast3M). Un intérêt particulier sera apporté à la gestion du couplage multiphysique. Cette base doit servir à garantir que les mises à jour futures du code Manta n'altèrent pas les résultats et les performances des simulations combustible.
3. De disposer de simulations d'essais expérimentaux (essai de flexion à 3 ou 4 points, compression uniaxiale, tube en pression interne), pour rejouer les tests d'identification de lois de comportement mécanique.

Ce stage offrira l'opportunité de contribuer à la validation et à l'amélioration du code Manta, tout en acquérant une expérience précieuse dans le domaine de la simulation des combustibles nucléaires au sein du CEA.

Manta étant développé en C++, une connaissance de ce langage serait un atout.

Référence

[1] MANTA : Un code HPC généraliste pour la simulation de problèmes complexes en mécanique. CSMA 2022 15ème colloque national en calcul des structures. Giens, France, Mai 2022. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03688160

- Formation souhaitée :

Master II en simulation mécanique des solides

3ème année d'école d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Manta, MFront, C++

- Mots clés :

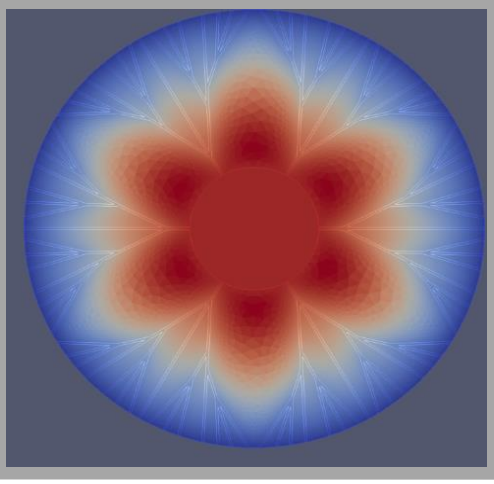
Simulation numérique.
Elements finis.

- Possibilité de thèse :

non

- Contacts :

Thomas Helfer
thomas.helfer@cea.fr



Optimisation de forme pour des combustibles innovants

DEC/SESC/LMCP

L'objectif de ce stage est d'implémenter une méthode d'optimisation de forme, afin d'aider à la conception de combustibles innovants.

Contexte : Depuis quelques années, et notamment depuis la catastrophe de Fukushima, l'industrie nucléaire cherche activement à développer des combustibles nucléaires plus sûrs (appelés Accident-Tolerant Fuel [1, 3]). Cela passe notamment par la conception de combustibles plus «froids» en fonctionnement nominal, ce qui peut s'obtenir par l'ajout d'additifs très conducteurs.

Objectif du stage : L'objectif de ce stage est d'implémenter une méthode d'optimisation de forme, dans le but d'aider à la conception de combustibles innovants. Ce faisant, il s'agira également d'en évaluer la performance. La méthode à implémenter repose sur des techniques mathématiques et numériques récentes [2].

Un aller-retour entre les résultats obtenus et la modélisation physique sera nécessaire, afin de reformuler des problèmes physiques complexes sous une forme mathématiquement et numériquement accessibles.

Le sujet proposé a un objectif appliqué relativement ciblé mais possède cependant une véritable composante exploratoire, et ouvre sur la thèse qui suit. Par ailleurs, il se trouve au carrefour de champs scientifiques variés : calcul scientifique (optimisation, éléments finis), mathématique (analyse des équations aux dérivées partielles, analyse multi-échelles), physique (modélisation, thermique, méca-nique).

Profil du candidat : Le candidat sélectionné sera de niveau M2. Il possèdera un solide bagage en calcul scientifique et analyse numérique dans un contexte d'équations aux dérivées partielles, ainsi que des notions d'optimisation. Idéalement, il aura également des connaissances de base en physique, notamment en thermique et mécanique des milieux continus, et sera familier de l'analyse mathématique. Enfin, il aura le goût de la recherche.

Thèse : Ce sujet de stage prépare une thèse débutant à la suite du stage, en Automne 2026.

Bibliographie :

[1] Review of accident tolerant fuel concepts with implications to severe accident progression and radiological releases, 2020.

[2] G. Allaire. Shape optimization by the homogenization method. 2002.

[3] Pavel G. Medvedev and Robert D. Mariani. Conductive inserts to reduce nuclear fuel temperature. 2020.

- Formation souhaitée :

M2 en Mathématiques Appliquées ou Calcul Scientifique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

FENICS, FreeFEM++

- Mots clés :

Optimisation de forme

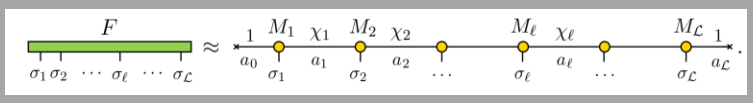
- Possibilité de thèse :

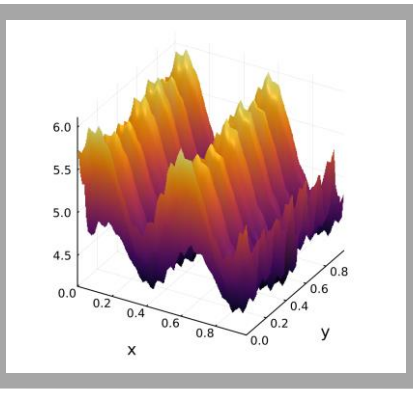
Oui

- Contact :

Marc Josien

Marc.josien@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.

Ces dernières sont des briques fondamentales pour la modélisation des phénomènes physiques dans les matériaux complexes. 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 EPDs 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.

[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.

- 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

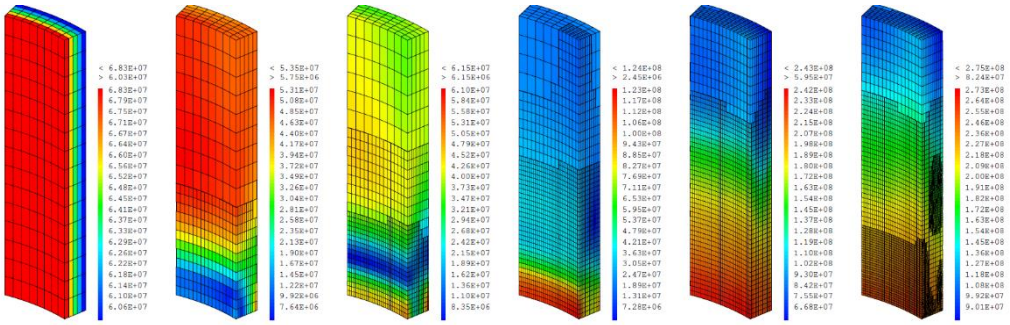
- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Josien Marc

marc.josien@cea.fr



Estimateur d'erreur à base d'ondelettes pour la mécanique des solides

DEC/SESC/LMCP

L'objectif du stage est de tester l'efficacité d'un estimateur a posteriori d'erreur à base d'ondelettes en vue du raffinement adaptatif de maillage en mécanique des solides

Le stage se déroulera à l'IRESNE (Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone) du **CEA Cadarache.** Il sera réalisé en étroite collaboration avec le CMAP (Centre de Mathématiques Appliquées) de l'école Polytechnique.

Dans le cadre de la simulation du comportement du combustible nucléaire, le CEA développe avec ses partenaires industriels la plateforme logicielle PLEIADES [1]. Au sein du couplage multiphysique réalisé dans le schéma de calcul des applications PLEIADES, la mécanique du solide joue un rôle essentiel. En effet, le combustible subit un certain nombre de changements mécaniques : déformations, contact, fissuration... Ce comportement mécanique doit être modélisé et simulé de façon précise.

Ainsi, depuis de nombreuses années, le CEA mène des travaux de R&D autour du raffinement local de maillage (ou AMR- adaptive mesh refinement en anglais) en mécanique des solides [2]. L'intérêt de l'adaptation locale de maillage est de ne raffiner que localement dans les zones d'intérêt le maillage et ainsi gagner en précision sans trop pénaliser le temps de calcul.

Un ingrédient essentiel dans le raffinement automatique de maillage est l'estimateur a posteriori d'erreur qui dicte les zones à raffiner. Traditionnellement, pour la mécanique des solides résolue par un solveur éléments finis, des estimateurs empiriques basés sur un lissage des contraintes sont utilisés car ils permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants [2].

Cependant, d'autres familles d'estimateurs peuvent être utilisées, en particulier on s'intéressera ici à celle s'appuyant sur des bases d'ondelettes. Plus connue sous le nom de multi-résolution, cette méthode est robuste car elle permet de contrôler finement l'erreur entre la solution sur le maillage fin et celle du maillage adapté. Habituellement utilisée en volumes finis [3], plusieurs cas d'usage existent en éléments finis [4] mais typiquement en mécanique des fluides.

Ainsi l'objectif de ce stage est d'évaluer les potentialités des estimateurs à base d'ondelettes pour la mécanique des solides. Ces estimateurs étant déjà disponibles dans le logiciel SAMURAI développé par le CMAP, les travaux de ce stage se placeront dans cet environnement logiciel.

Étapes du stage :

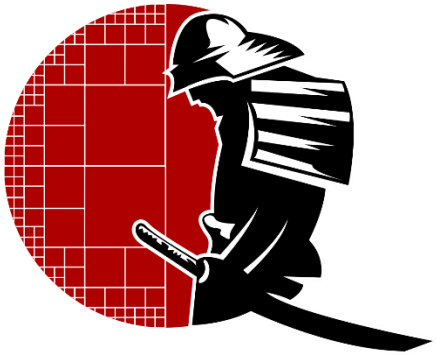
- Prise en main du sujet : mécanique des solides, raffinement adaptatif de maillage, estimateurs a posteriori d'erreur.
- Prise en main du logiciel SAMURAI.
- Adaptation des estimateurs à base d'ondelettes dans un cadre éléments finis pour la mécanique élastique.
- Mise en place d'un estimateur basé sur le lissage des contraintes de type Zienkiewicz and Zhu (courant en mécanique des solides)
- Comparaison des différentes approches et tests numériques.

[1] S. Bernaud et al. PLEIADES: A numerical platform dedicated to the multiphysics and multiscale nuclear fuel behaviour simulation, Annals of Nuclear Energy, Vol. 205, 110577, 2024.

[2] D. Koliesnikova, I. Ramière and F. Lebon. A uni_x001c_ed framework for the computational comparison of adaptive mesh re_x001c_nement strategies for all-quadrilateral and all-hexahedral meshes: Locally adaptive multi-grid methods versus h-adaptive methods, Journal of Computational Physics, volume 437, 110310, 2021.

[3] Bihari, Barna L., and Ami Harten. "Multiresolution schemes for the numerical solution of 2-D conservation laws I." *SIAM Journal on Scientific Computing* 18.2 (1997): 315-354.

[4] Mishin, Y.A.; Vasilyev, O.V.; Gerya, T.V. A Wavelet-Based Adaptive Finite Element Method for the Stokes Problems. Fluids 2022, 7, 221. https://doi.org/10.3390/fluids7070221



- Formation souhaitée :

  École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées, mécanique numérique

- Durée du stage :

  6 mois

- Méthode/logiciel(s):

  Méthode des éléments finis, C++, Linux, SAMURAI

- Mots clés :

  éléments finis, adaptation de maillage, méthodes numériques, multi-résolution, ondelettes

- Possibilité de thèse :

  Oui

- Contacts :

RAMIÈRE Isabelle isabelle.ramiere@cea.fr

GOUARIN Loïc loic.gouarin@polytechnique.edu

MASSOT Marc marc.massot@polytechnique.edu

Département d'Etudes des réacteurs

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 Sûreté 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 Departement

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).

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des réacteurs / Reactor *Studies Departement*

SERJH – Service exploitation réacteur Jules Horowitz

Observation du cœur RJH par tomographie in situ
Etudes neutroniques et thermo-hydrauliques des dispositifs FUSERO
Analyse thermohydraulique d'un assemblage combustible nucléaire par une approche CFD pour appuyer son dimensionnement thermomécanique

SESI – Service d'étude des systèmes innovants

Enhancing nuclear flexibility with battery storage: Techno-Economic and Design of a hybrid energy system
Conception et prédimensionnement d'un microréacteur pour l'alimentation d'une mission sur Mars
Optimisation du schéma de préconception de la boucle primaire d'un réacteur à sels fondus
Étude des écoulements de convection naturelle monophasique en réservoir à l'aide du module 3D de CATHARE-3
Modélisation et intégration dans un SMR de systèmes passifs innovants
Développement d'un outil simplifié dédié à la conception de RNR-Na ayant pour but la prise en compte de la détente d'une bulle polyphasique lors d'un accident grave
Développement d'un outil simplifié dédié à la conception de RNR-Na ayant pour but la prise en compte d'une perte de débit primaire et comparaison à des données expérimentales
Étude des performances et de la sûreté d'un réacteur à sels fondus (MSR) équipé d'un cycle de conversion d'énergie
Etude du fonctionnement d'un concept de réacteur à sel fondu incinérateur de déchets nucléaires avec le code CATHARE3
Modélisation et étude de la boucle thermohydraulique HERMES-P avec le code de calcul système CATHARE
Machine Learning pour la conception de prototypes de systèmes nucléaires
Simulation du pilotage d'un générateur de vapeur compact associé à un cycle Rankine de production d'électricité et de chaleur: commandes linéaire et avancée (data-driven)
Modélisation Multiphysique du Réacteur PULSTAR avec les Codes APOLLO3 pour la Neutronique et CTF et FLICA pour la Thermohydraulique
Modélisation physico-numérique d'un transitoire accidentel dans un réacteur à eau pressurisée (REP) avec une méthode statistique avancée (machine learning)
Propulsion nucléaire électrique : études de performances pour des missions vers Mars

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des réacteurs / Reactor *Studies Departement*

SPESI – Service de physique expérimentale d'essais en sûreté et d'instrumentation

Evaluation des performances de détection d'un flux de neutron avec un scintillateur de type pérovskite organique-inorganique
Optimisation de la durée de calcul d'un réseau de neurones sur un réseau Spark appliqué à la détection de bruit neutronique en réacteur
Mise en place d'Intégration Continue (CI) pour un logiciel de mesure nucléaire
Qualification de Fibres à Réseaux de Bragg pour la Mesure de Température en Réacteur Nucléaire
Développement et qualification et d'un logiciel d'analyse d'essais transitoires sur le réacteur CABRI
Qualification d'un système de mesure nucléaire
Supervision du réseau d'acquisition temps réel du réacteur CABRI

SPRC – Service de physique des réacteurs et du cycle

Évolution neutronique du cœur RJH
Conception neutronique d'un réacteur nucléaire à propulsion électrique pour les applications du spatial
Développement d'un formulaire pour l'exploration et l'optimisation de cœurs de réacteur à neutrons rapides
Modélisation neutronique de poisons consommables pour les études du cycle combustible
Démarrage d'un réacteur à eau légère avec le chauffage nucléaire et la circulation naturelle
Création d'une base de données pour l'entraînement de modèles d'apprentissage automatique en physique des réacteurs
Mise en œuvre de schémas de calcul neutronique avancés avec le code APOLLO3® pour le traitement de configurations dégradées au cours d'accidents graves de RNR-Na
Validation des sensibilités couplées Boltzmann/Bateman en contexte de modification du plan de chargement
Analyse neutronique de l'effet de l'ajout d'additifs dans la pastille UO_2 ATF
Nuclear fission modes and fragments in a multidimensional deformation space
Vers une exploitation optimale et robuste de la base de validation expérimentale de l'Outil de Calcul Scientifique CRISTAL pour la sûreté-criticité
Contribution à l'analyse des mesures de rendement de neutrons retardés, par fission thermique de l'U233, de l'U235 et du Pu239
Influence des déformations des assemblages de combustible sur l'inventaire isotopique en fin d'irradiation

Sujets de stage
Internships Subjects

Département d'études des réacteurs / Reactor *Studies Departement*

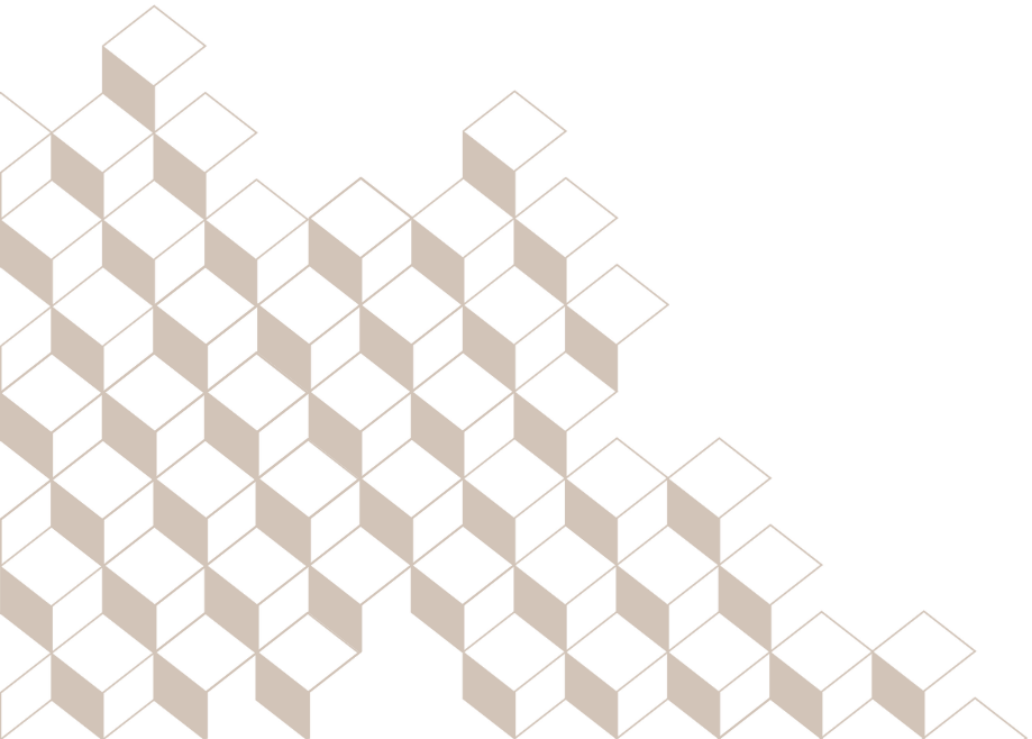
SPRC – Service de physique des réacteurs et du cycle (suite)

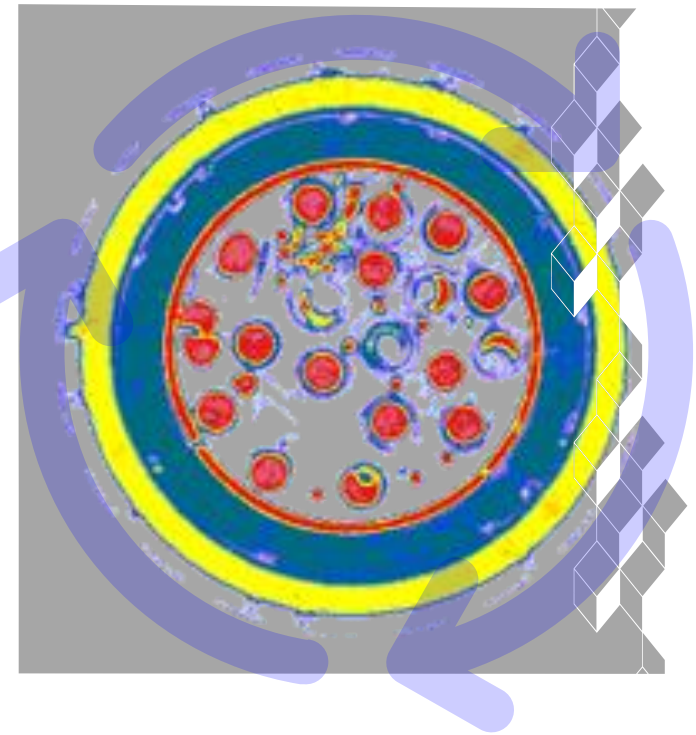
Validation des fonctionnalités de calcul de perturbation exacte dans l'outil de calcul LAST pour l'estimation d'incertitudes technologiques sur des calculs de réacteur
Développement et amélioration des outils d'évaluation des rendements de fission : applications à la réaction $^{241}Am(n_{th},f)$
Application de Machine Learning à l'étude des biais de modèles pour les calculs de cœurs de réacteurs innovants
Modélisation thermohydraulique raffinée d'un assemblage chaud pour recherche de REC dans l'OCS de neutronique NARVAL3
Modélisation d'une source neutronique de démarrage (alpha,n) à structure granulaire
Implémentation d'un schéma de calcul réseau en base Monte-Carlo pour des SMR sans bore soluble
Impact de la nouvelle évaluation JEFF-4.0 sur les modélisations SMR TRIPOLI-4, TRIPOLI-5, CRONOS2 et APOLLO3
Développement d'un modèle de calcul cœur REP pour l'évolution de sources de démarrage

S E R J H

Service exploitation réacteur Jules Horowtiz

Jules Horowitz Reactor Operations Unit





Observation du cœur RJH par tomographie in situ

DER / SERJH / LFSC

Dans l'intention d'améliorer les mesures regroupées par les chambres de puissance, l'objectif de cette étude est de reconstruire en ligne une carte des taux de fission par tomographie.

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 assemblages combustibles. Ces éléments tubulaires sont formés de 3×8 plaques concentriques. Et 27 parmi eux accueillent des absorbants neutroniques pour la sûreté et la régulation de puissance.

L'insertion/extraction continue de ces barreaux absorbants détermine la distribution de flux dans le cœur, et les échauffements qui en résultent en tout point, ce qui est déterminant pour la sûreté comme les performances du réacteur.

La cote des absorbants est connue par des observations mécano-électriques déportées à plusieurs mètres du cœur. La puissance globale est connue grâce à des mesures de taux de réaction également distants.

Il n'est donc pas possible à ce stade d'apporter une restitution spatiale directe des taux de fission dans le cœur.

L'objectif du stage est d'étudier, à partir de la feuille blanche, la faisabilité d'un dispositif innovant permettant de caractériser par tomographie d'émission en ligne les taux de fission dans le cœur du RJH.

Les principales disciplines mises en œuvre sont la mécanique, la neutronique et l'instrumentation nucléaire,

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 de tomographie spécialisées. Le/la stagiaire proposera une méthodologie d'optimisation pour sélectionner la meilleure.

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

Les résultats pourront être extrapolés à de nombreuses autres applications dans le domaine du contrôle des réacteurs de puissance ainsi qu'à des fins de maîtrise de la prolifération nucléaire grâce à des observations satellitaires.

- Formation souhaitée :

BAC +4-5 (Ingénieur généraliste ou Master), physique des réacteurs, modélisation physique, IA.

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

APOLLO2, TRIPOLI4, python, matlab, bash, C++, Machine Learning.

- Mots clés :

Méthodes numériques et instrumentation

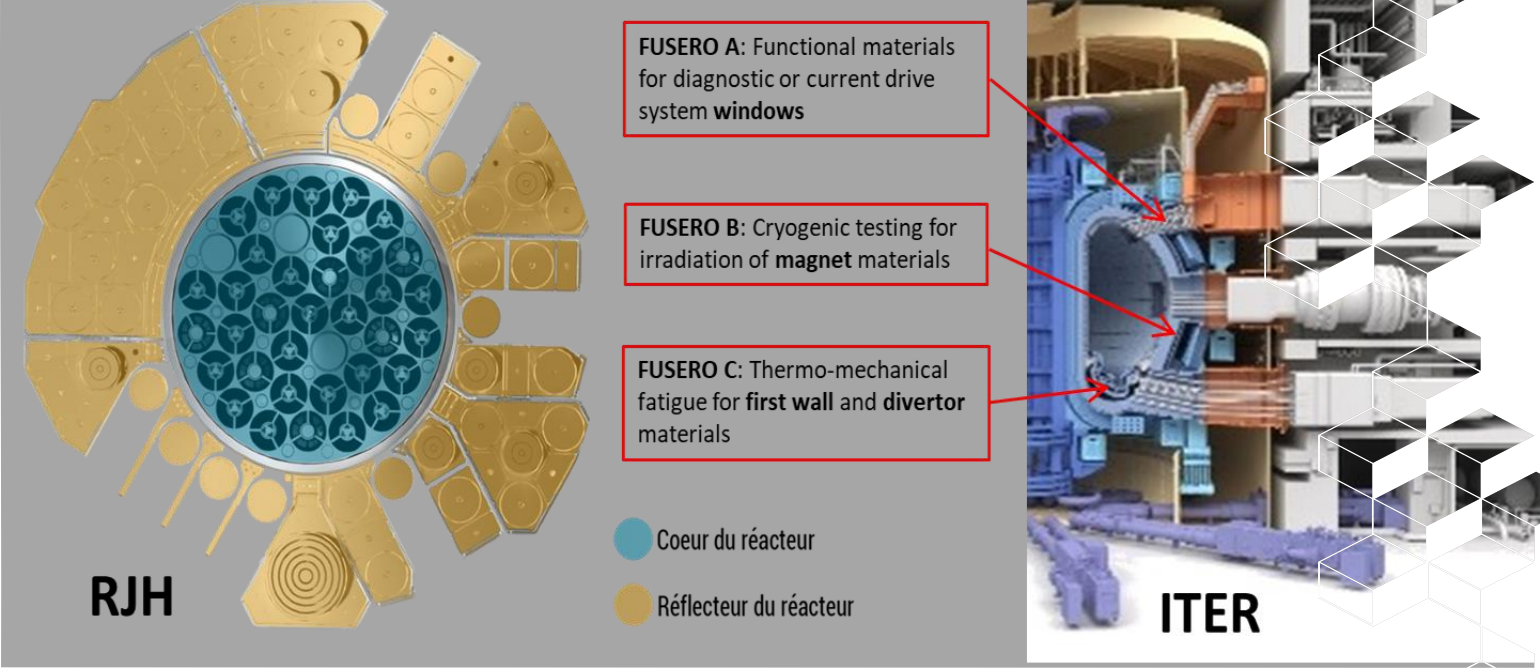
- Possibilité de thèse :

Un post-doc serait plus vraisemblable

- Contact :

RITTER Guillaume

Guillaume.Ritter@cea.fr



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. 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 :**

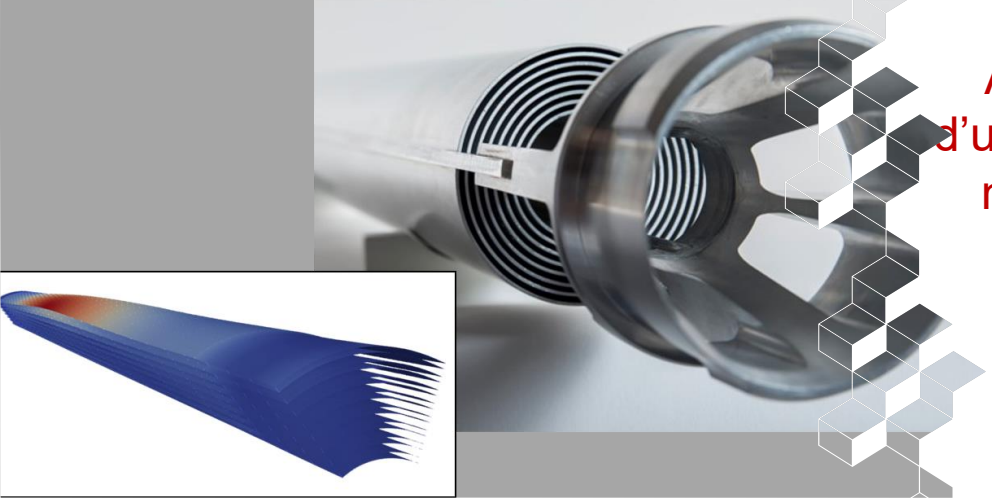
RJH, dispositifs expérimentaux

- **Possibilité de thèse :**

non

- **Contact :**

David Blanchet, Christian Colin
christian.colin@cea.fr
david.blanchet@cea.fr



Analyse thermohydraulique d'un assemblage combustible nucléaire par une approche CFD pour appuyer son dimensionnement thermomécanique

DER/SERJH/LFSC

Afin d'étudier en profondeur le comportement d'un assemblage combustible en réacteur, l'objectif est de développer une méthodologie de calculs couplée permettant d'intégrer les effets de la thermohydrauliques et de la thermomécanique.

Contexte et enjeux

Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur nucléaire de recherche en construction sur le centre de Cadarache, consacré principalement à la recherche sur les matériaux et les combustibles pour l'industrie électronucléaire et la production de radio-isotopes pour la médecine nucléaire.

Le CEA mène notamment des activités de R&D sur le combustible nucléaire envisagé pour ce réacteur de recherche, lesquelles associent simulation numérique, modélisation et expérimentation.

Dans ce contexte, le Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz (SERJH) a notamment pour mission de modéliser l'écoulement et les transferts thermiques mis en jeux dans un assemblage combustible prévu pour le RJH.

Le stage s'inscrit dans un contexte collaboratif entre la R&D du SERJH et celle du Service d'Etudes et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC) chargée de modéliser thermiquement et mécaniquement l'assemblage combustible.

Objectifs du stage

Au sein du Laboratoire Fonctionnement, Sûreté et Calculs (LFSC), le stage aura les objectifs suivants :

- Réaliser des études thermohydrauliques pour différentes configurations d'intérêt. Les simulations numériques seront réalisées avec les ressources du CEA, à l'aide de l'Outil de Calcul Scientifique (OCS) Star-CCM+ pour réaliser les études CFD. L'utilisation ponctuelle d'un logiciel de CAO est envisageable, à défaut du module interne de Star-CCM+. Des méthodes 0D/1D pourront également être mises en œuvre.
- Exploiter les résultats des simulations thermomécaniques réalisées en parallèle au SESC avec l'outil PLEIADES/MAIA (contexte de chaînage/couplage de codes de calcul) ;
- Étudier la rétroaction des effets thermomécaniques sur la thermohydraulique, et inversement.
- Collaborer étroitement avec le/la stagiaire qui réalisera les calculs thermomécaniques dont les données seront exploitées, en vue de remplir les 2 autres objectifs, à travers un binômage avec un autre stage dédié.

La déroulé du stage nécessitera de :

- Acquérir une compréhension des comportements thermomécaniques et thermohydrauliques des plaques de combustible du Réacteur Jules Horowitz, en s'appropriant :
  - ➢ Les éléments bibliographiques pertinents pour l'exercice demandé ;
  - ➢ Le lancement et l'analyse de calculs CFD, avec ses hypothèses, limites et sources d'incertitudes, ainsi que les interdépendances entre modèles physiques couplés ;
- Construire à partir de différents scripts Python préexistants des outils permettant notamment d'exploiter les résultats de simulation thermomécanique directement dans Star-CCM+, et inversement.

Au cours des travaux, il pourra notamment s'avérer pertinent de :

- S'intéresser aux possibilités de prise en compte des conditions thermohydrauliques considérées directement dans un modèle dédié dans PLEIADES/MAIA, sur la base des calculs CFD ;
- Consolider les analyses en proposant des éléments critiques vis-à-vis des résultats obtenus (études de sensibilité, etc.).

Compétences

- Une familiarité avec le logiciel Star-CCM+ ainsi que le fonctionnement sous Linux constitue un atout certain. Des connaissances en thermomécanique seraient appréciées
- Une expérience en Python, tout particulièrement avec des packages spécialisés en traitement et visualisation de données, est fortement appréciée.

Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 en Mathématiques Appliquées

Intérêt pour la simulation numérique appliquée à des problèmes multiphysiques

Durée du stage :

6 mois

Méthode/logiciel(s):

Python, PLEIADES/MAIA, code CFD, environnement Linux et Windows

Mots clés :

Simulation, Multiphysique, Thermohydraulique, RJH, combustible, Mécanique

Possibilité de thèse :

Non

Contact :

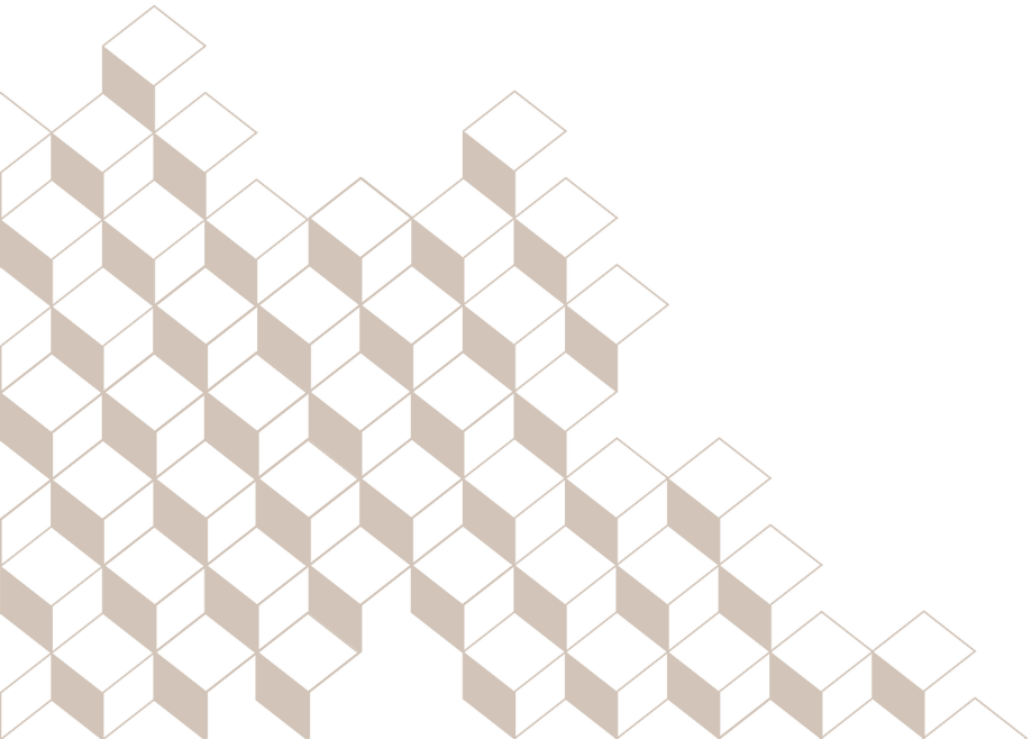
BESSE Lucas

lucas.besse@cea.fr

S E S I

Service d'étude des systèmes innovants

Innovative Systems Research Unit



ENHANCING NUCLEAR FLEXIBILITY WITH BATTERY STORAGE: TECHNO-ECONOMIC AND DESIGN OF A HYBRID ENERGY SYSTEM

IRESNE/DER/SESI/LCOS

A part of the stability of power systems depends on the ability to maintain a balance between generated and consumed power. To achieve this, two mechanisms are involved:

- **Load following, to address forecasted fluctuations in consumption and intermittent production, by anticipating the required production in advance;**
- **Frequency regulation, to address stochastic fluctuations in the production-consumption balance, by reserving a power margin to adjust the production in case of imbalance. This means that nuclear power plants participating in frequency regulation do not operate at their maximum possible output.**

On the one hand, the increasing electrification of end-uses, combined with the massive integration of intermittent renewable energies replacing carbon-based energy sources, will require enhancing the flexibility of nuclear reactors so that they can contribute even more effectively to grid stability mechanisms.

On the other hand, many countries have recently developed large-scale battery storage systems, with capacities exceeding 1 GWh and power ratings of several hundred MW. These systems have reached sufficient technological maturity for these countries to use them as reserves for frequency regulation.

In this context, the Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS) of Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI) is working on designing and optimizing hybrid nuclear systems from a technical, economic, and safety perspective. This internship is part of this effort and aims to quantify how coupling batteries with nuclear reactors could increase reactor availability, improve the power ramp rates they can achieve, and reduce their costs.

To achieve this, the internship will be carried out in several stages:

- Familiarization with the concepts of flexibility, load following, frequency regulation, and electricity markets
- Conducting a techno-economic review of battery storage (technologies, TRL, costs)
- Collecting and processing publicly available data on load following and frequency regulation (contracted power, deployed energy, remuneration, etc.)
- Learning to use the PERSEE optimization software
- Modeling a consumption and frequency regulation time series in PERSEE
- For a given nuclear reactor, sizing the storage needs for load following and frequency regulation
- Economic analysis of the costs and benefits of the nuclear-battery system
- Depending on the progress of the internship, the potential valorization of the work through the writing of a scientific paper might be considered.

- Formation souhaitée :

Master's degree

Energy or nuclear engineering

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

Python, C++

Microsoft Office, PERSEE

- Mots clés :

Nuclear flexibility, Battery storage, Techno Economic analysis, electricity market

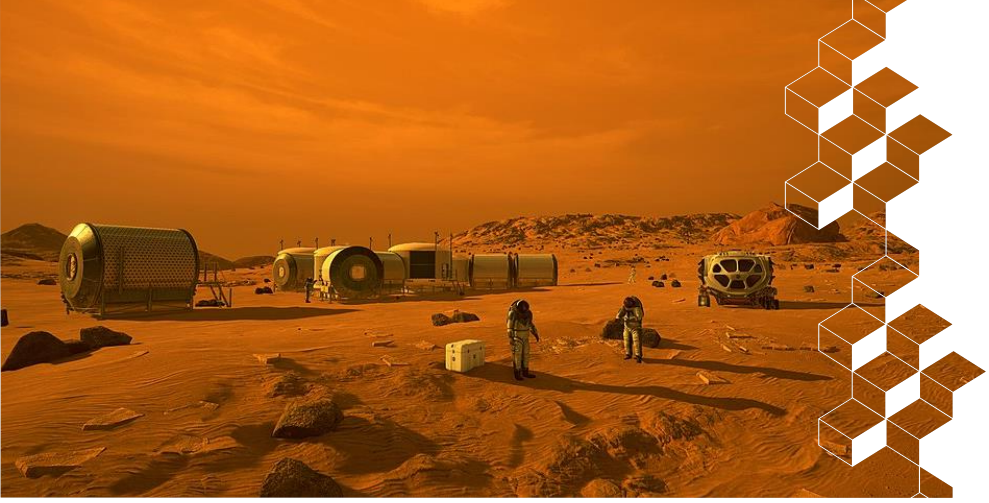
- Possibilité de thèse :

No

- Contact :

Charly BOUDOT, Juan-Pablo SCOTTA

charly.boudot@cea.fr



Conception et prédimensionnement d'un microréacteur pour l'alimentation d'une mission sur Mars

DER/SESI

Stage dédiée à l'optimisation du système de conversion d'énergie d'un microréacteur modulaire (MMR) pour une mission sur Mars

L'exploration spatiale exige des solutions énergétiques fiables et performantes. Pour certaines missions, notamment celles de longue durée sur la Lune ou Mars, l'énergie nucléaire se révèle être la solution la plus adaptée pour répondre à ces besoins énergétiques spécifiques.

Les exigences de conception pour les réacteurs destinés à ces applications sont particulièrement strictes, notamment en termes d'efficacité massique. Ce stage vise à étudier l'optimisation du système de conversion d'énergie (SCE) d'un concept existant en explorant des configurations alternatives innovantes.

Le concept de réacteur étudié comprend un cœur compact d'une puissance de 6 MWt, utilisant un combustible à base d'uranium-carbure (UC) et un réflecteur en béryllium. Il intègre un système de conversion d'énergie (SCE) en cycle Brayton fermé, avec du CO_2 supercritique comme fluide de travail et des panneaux radiatif-convectifs servant de source froide. La surface de ces panneaux dépasse 4 000 m², ce qui fait que le système de source froide constituera la majeure partie de la masse totale du système.

Pour améliorer l'efficacité de ce concept, nous proposons d'explorer dans un premier temps un cycle de conversion en configuration ouverte, utilisant directement l'atmosphère martienne (principalement composée de CO_2 à une pression de 6 mbar) comme fluide de travail. Un concept similaire avec de l'air terrestre a déjà été étudié aux États-Unis dans les années 1960 dans le cadre du programme de propulsion nucléaire pour avions (Aircraft Nuclear Propulsion program), menant notamment aux expériences HTRE réalisées en Idaho.

Une autre configuration à explorer dans un second temps consiste à utiliser un fluide réactif comme fluide de travail dans un cycle Brayton conventionnel. Ces fluides subissent, au cours du cycle thermodynamique, non seulement des changements de phase, mais aussi des modifications de composition chimique, souvent par association ou dissociation de molécules en fonction de la pression. Une réaction exothermique durant la détente en turbine fournit ainsi un travail mécanique supplémentaire, tandis que la compression est facilitée par la réaction endothermique qu'elle provoque. Le rendement du cycle thermodynamique est ainsi amélioré sans nécessiter d'équipements ou de circuits supplémentaires. Pour les systèmes énergétiques spatiaux, où l'efficacité et la simplicité sont primordiales, cette approche peut offrir un avantage décisif.

Le stage proposé vise à étudier le dimensionnement des systèmes de conversion d'énergie (SCE) mentionnés. Après une revue bibliographique approfondie, des modèles thermodynamiques simplifiés des SCE seront développés à l'aide de l'outil de calcul CYCLOP (développé en interne) et du logiciel EES. Des études paramétriques seront ensuite réalisées avec ces modèles pour évaluer et optimiser les différentes configurations. Un prédimensionnement de certains composants permettra d'évaluer l'intérêt de ces configurations en termes d'efficacité massique, de robustesse et de fiabilité.

Le stage nécessite une solide compréhension des procédés et concepts thermodynamiques, ainsi qu'une aisance avérée dans le calcul scientifique. Une expérience préalable avec des logiciels de simulation et de modélisation thermodynamique serait un atout supplémentaire. De plus, un intérêt pour le domaine spatial, couplé à une curiosité intellectuelle et à une créativité prononcée, seront des qualités essentielles pour réussir dans ce projet. Le candidat idéal saura faire preuve d'initiative et de rigueur, tout en étant capable de s'adapter aux défis techniques et scientifiques rencontrés.

- Formation souhaitée :

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

- Durée du stage :

4-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

CYCLOP, EES, Python

- Mots clés :

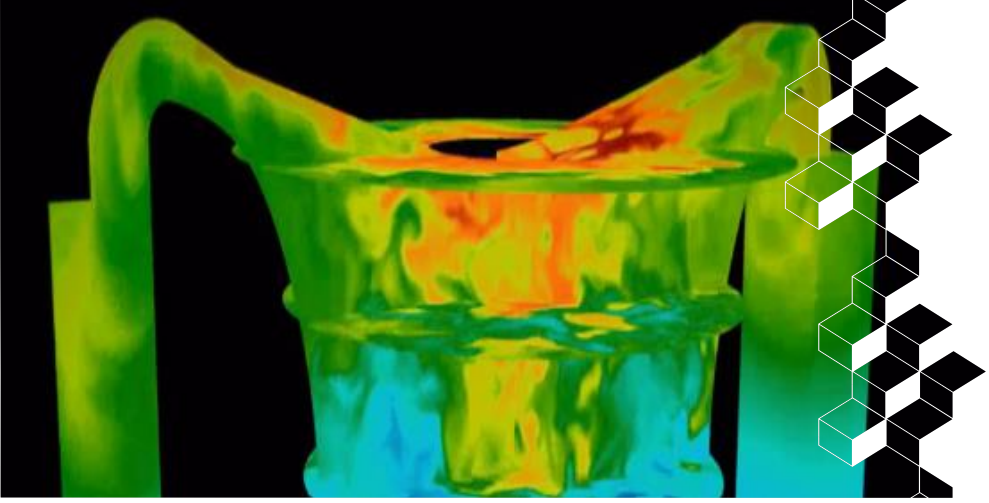
MMR, SCE, spatial

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

DÖDERLEIN Christoph
christoph.doderlein@cea.fr



Optimisation du schéma de préconception de la boucle primaire d'un réacteur à sels fondus

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Les réacteurs à sels fondus (Molten Salt Reactors ou MSR) reposent sur le principe de l'intégration du combustible dans le caloporteur sous forme liquide. Ils font l'objet de différents projets à l'international dans le cadre des réacteurs de quatrième génération. Les MSR présentent des caractéristiques intéressantes en matière de sûreté intrinsèque et de capacité à incinérer des déchets radioactifs provenant des autres filières nucléaires.

Au CEA un programme préliminaire de R&D a été lancé en 2020 autour des réacteurs rapides à sels fondus dédiés à la conversion des actinides. L'objectif étant d'étudier la faisabilité et d'identifier les verrous techniques de cette filière. Pour l'heure, le niveau de maturité technologique des MSR n'est pas encore suffisant pour un déploiement industriel et ses verrous sont nombreux.

Dans le cadre des activités de R&D, de multiples designs de MRS ont été proposés, présentant des avantages et des contraintes différents. Ces designs se distinguent par plusieurs paramètres, tels que le type de sel combustible ; l'architecture du système ; la fonction visée pour le réacteur qu'il s'agisse d'un réacteur incinérateur d'actinides ou réacteur de forte puissance, etc.

Dans le cadre de ce stage, nous nous intéressons à la possibilité de considérer et comparer les différentes possibilités de design lors de la phase de préconception afin d'orienter les choix de design dès les phases d'avant-projet.

Au sein du laboratoire LCOS, le code ATOS (Advanced Tools for the Optimization of System for Molten Salt Reactor) est utilisé pour la préconception des systèmes MSR. Ce code est un outil de prédimensionnement simplifié et rapide permettant de mener des études de sensibilité et de propagation des incertitudes. L'aspect programmation orientée objet d'ATOS permet une interaction simple avec d'autres outils.

Pendant ce stage, nous utiliserons ce code pour mettre en place un schéma d'optimisation de l'architecture de la boucle combustible d'un MSR. Ce couplage permettra de comparer une gamme de designs et de définir les choix préliminaires à faire vis-à-vis des différents objectifs dès la phase de préconception. Le schéma d'optimisation prendra également en compte les contraintes de conception, telles que, les contraintes de sûreté ou de fonctionnement.

Le stage se déroulera en différentes étapes :

- acquisition des compétences liées à la conception des réacteurs de 4ème génération, en particulier des systèmes MSR ;
- bilan et analyse des paramètres clés à prendre en compte lors de la phase de conception d'un MSR ;
- évaluation des objectifs de conception des réacteurs MSR, ainsi que des contraintes physiques, de sûreté et d'exploitation associées;
- prise en main du code ATOS à travers la réalisation d'un pré-design de la boucle primaire d'un concept de référence ;
- implémentation d'un schéma d'optimisation sous contraintes, basé sur ATOS et des librairies dédiées ;
- analyse des résultats issus de plusieurs études de cas d'optimisation.

Le stage se déroule au Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI) au Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS). Ce laboratoire est une unité pluridisciplinaire porteuse de compétences en conception, fonctionnement et sûreté des réacteurs nucléaires, thermo hydraulique, énergétique et tech-éco. Le stage sera également co-encadré avec le laboratoire d'Etudes des Cœurs et du Cycle (LE2C) du Service de Physique des Réacteurs et du Cycle (SPRC) dont ses compétences portent sur la physique nucléaire, physique expérimentale et neutronique, du cycle du combustible et des études de scénarios de parcs électronucléaires.

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 :

Molten Salt Reactor (MSR); Physique des réacteurs; Préconception; Etude d'optimisation

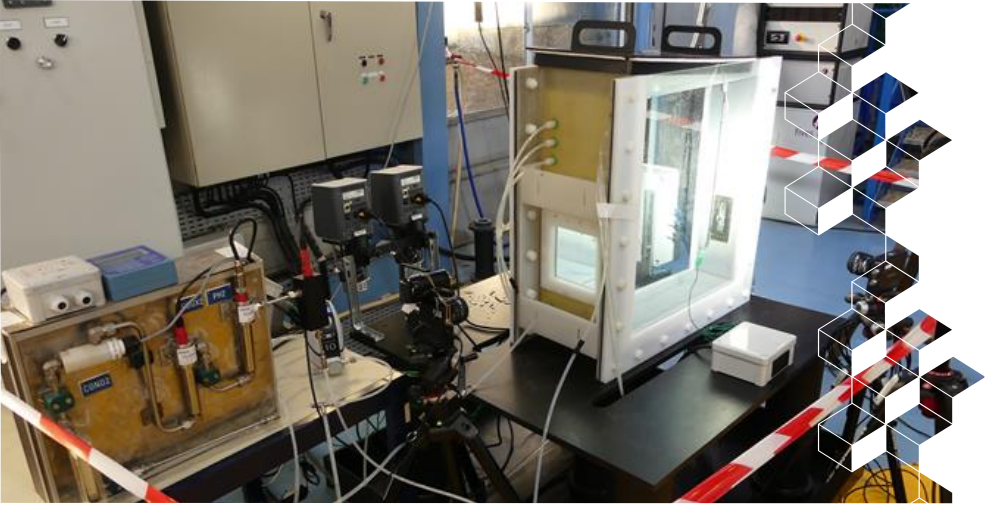
Possibilité de thèse :

Non

Contact :

FORNO Barbara
Barbara.FORNO@cea.fr

JOHANN MARTINET
Johann.MARTINET@cea.fr



Étude des écoulements de convection naturelle monophasique en réservoir à l'aide du module 3D de CATHARE-3

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Les nouveaux concepts des réacteurs nucléaires peuvent avoir des géométries qui ne correspondent pas aux applications classiques des codes de thermo-hydraulique système, lesquels n'ont pas été initialement conçus pour modéliser les phénomènes 3D en milieu ouvert notamment. Dans ce contexte, la modélisation & simulation de tests expérimentaux comme ANUBIS peuvent aider à améliorer la représentation des phénomènes en jeu.

En France, le code CATHARE-3 [1] est largement utilisé pour l'analyse transitoire des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) classiques. Cependant, ces dernières années, plusieurs concepts de réacteurs innovants ont émergé, avec des géométries et des conditions jamais testées auparavant dans CATHARE. Un exemple est ARCHEOS [2], un réacteur actuellement en développement au DER/SESI/LCOS pour lequel les circuits primaire et secondaire fonctionnent tous deux en convection naturelle (CN), le secondaire étant de type milieu ouvert. La complexité des phénomènes se produisant dans la piscine nécessite l'utilisation d'outils tridimensionnels.

Le module 3D de CATHARE-3 résout un ensemble d'équations de conservation tridimensionnelles avec un effort de calcul réduit en comparaison aux codes CFD reposant sur un maillage plus fin. Déterminer si CATHARE-3 est capable de représenter les écoulements au sein de géométries comme celle d'ARCHEOS pourrait permettre d'économiser un temps et un effort de calcul significatifs.

Le stage proposé consiste à utiliser le module 3D de CATHARE-3 pour modéliser et simuler l'expérience ANUBIS [3] qui va redémarrer en Octobre 2025 afin d'étudier la convection naturelle dans un réservoir. La CN est générée par une source de chaleur localisée au fond du réservoir, avec des pertes thermiques à l'interface entre l'eau et l'air. Plusieurs parois en plexiglass permettent la visualisation de l'écoulement à l'aide de techniques avancées telles que la vélocimétrie par images de particules (PIV) et la shadowgraphie, offrant ainsi des données précieuses permettant de valider les outils de simulation à l'échelle locale. Un benchmark entre les résultats du stage et ceux obtenus par un doctorant à l'échelle CFD sera mené.

Ce stage durera 6 mois et sera divisé en 3 parties :

1) Familiarisation avec le code thermo-hydraulique CATHARE-3 et son module 3D :
   - Travaux dirigés sur les divers modules de CATHARE-3, dont le module 3D

2) Modélisation de l'expérience ANUBIS avec le module 3D de CATHARE-3 :
   - Modèle 2D du réservoir
   - Extension à un modèle 3D

3) Comparaisons et adaptations :
   - Comparaison des résultats de la simulation avec les données expérimentales
   - Amélioration du modèle pour réduire les écarts
   - Benchmark avec la CFD

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] CATHARE web site https://cathare.cea.fr/

[2] ARCHEOS LinkedIn page https://www.linkedin.com/company/archeos-heat/posts/?feedView=all

[3] Martin, J. et al. (2025, August). An overview of ongoing and planned R&D activities in the field of experimental two-phase thermal-hydraulics at CEA IRESNE. Proceeding of NURETH-21, Busan, South Korea.

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

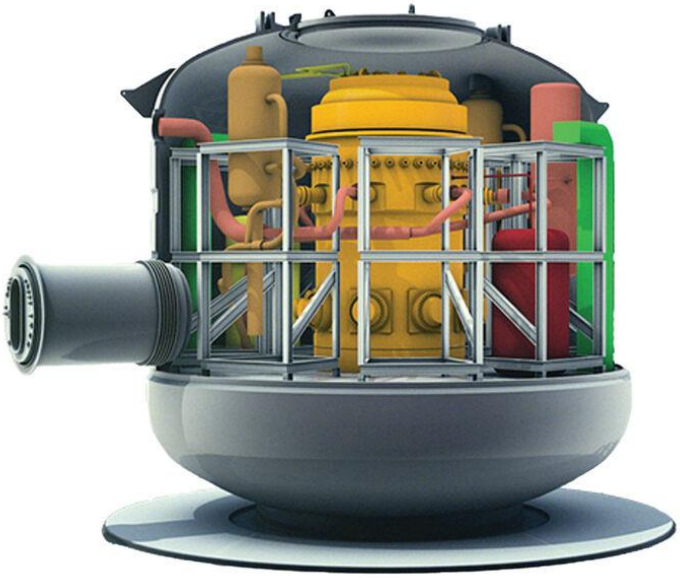
6 mois

CATHARE-3, python, linux

CATHARE, convection naturelle, thermo-hydraulique, module 3D

No

David GIRON CEBALLOS Ceballos & Laura MATTEO
david.gironceballos@cea.fr



Modélisation et intégration dans un SMR de systèmes passifs innovants

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Stage dédié à la modélisation avec le code thermohydraulique système CATHARE 3 de systèmes passifs innovants, ainsi que leurs intégration dans un réacteur SMR

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.

Certains de ces systèmes passifs reposent néanmoins sur des moyens actifs (par exemple : ouverture d'une vanne alimentée par batterie), ce qui les classent en catégorie D selon la classification AIEA. Des composants innovants ont donc été imaginés afin d'augmenter la passivité de ces systèmes, permettant leur classification en catégorie C.

L'objectif du stage est de modéliser ces composants innovants avec le code thermohydraulique système CATHARE 3, ainsi que d'intégrer ces modélisations et de les tester dans la modélisation complète d'un SMR. Il est également prévu dans le cadre de ce stage de laisser du temps pour proposer de nouveaux composants innovants à intégrer dans le design du SMR.

Dans un premier temps, l'étudiant sera amené à se familiariser avec les composants innovants déjà existants. Dans un second temps, il se familiarisera avec le code CATHARE 3 ainsi que la modélisation existante du SMR. Puis il sera amené à modéliser les composants innovants et les intégrer dans la modélisation du SMR, ainsi qu'à réaliser des calculs de transitoires accidentels. Enfin, il pourra proposer de nouveaux composants innovants.

Le stage se déroule à l'IRESNE au CEA/Cadarache

- 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 :

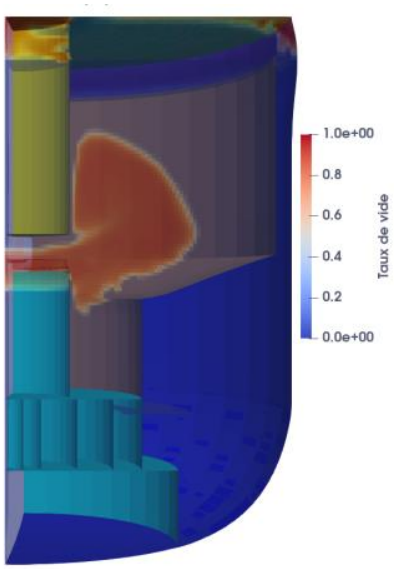
SMR, système passif, innovation

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Grosjean Baptiste
baptiste.grosjean@cea.fr



Développement d'un outil simplifié dédié à la conception de RNR-Na ayant pour but la prise en compte de la détente d'une bulle polyphasique lors d'un accident grave

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Le LCOS (Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes) cherche un.e stagiaire ingénieur.e ayant une formation en thermique, mécanique des fluides et méthodes numérique 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 refroidi au sodium.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) sont l'un des six concepts de réacteurs dit 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.

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 entrainant une fusion généralisée du cœur, une situation de recriticité est susceptible de se produire engendrant une détente violente en mesure d'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 but de :

- Faire une étude bibliographique afin de s'approprier le sujet et d'acquérir les compétences nécessaires sur les RNR-Na, les accidents et la détente d'une bulle,
- Prendre en main le code MORENa qui simule la détente 1D d'une bulle de combustible surchauffé dans la cuve d'un RNR-Na,
- Adapter le code MORENa pour permettre des calculs dans des géométries non supportées pour le moment et notamment dans des configurations multi-1D où la détente est toujours modélisée en 1D mais où la bulle peut emprunter plusieurs chemins différents,
- Faire une étude de sensibilité aux paramètres d'entrées,
- Suivant l'avancée du stage une comparaison avec un code de référence viendra enrichir ce travail.

- Formation souhaitée :

Génie nucléaire, mécanique des fluides, thermique, méthodes numériques

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python

- Mots clés :

RNR-Na, accidents, détente, modélisation

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Mickaël LE BOHEC,
mickael.lebohec@cea.fr

Développement d'un outil simplifié dédié à la conception de RNR-Na ayant pour but la prise en compte d'une perte de débit primaire et comparaison à des données expérimentales

IRESNE/DER/SES/LCOS

Les laboratoires de préconception et d'optimisation des systèmes (LCOS) et d'étude et de modélisation des systèmes (LEMS) cherchent un.e stagiaire ingénieur.e ayant une formation en thermique, mécanique des fluides et méthodes numériques pour participer au développement d'un outil simplifié dédié à la prise en compte de transitoire de perte de débit primaire 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 dit 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.

Dans ces réacteurs, l'un des évènements dimensionnant les plus étudié est la perte de débit primaire non protégé (ULOF - Unprotected loss of flow) qui peut notamment survenir lors d'une perte d'alimentation électrique. Dans ce scénario, le cœur est drastiquement moins refroidi, ce qui peut mener à sa dégradation.

Le stage sera effectué au sein du LCOS (Laboratoire de Conception et d'Optimisation des Systèmes) et en partenariat avec le LEMS (Laboratoire d'Etude et de modélisation des systèmes). Le LCOS est spécialisé dans la conception et l'analyse de nombreuses technologies de réacteurs, en fonctionnement normal ou accidentel. Il 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 LEMS quant à lui dispose d'une solide expertise sur le réacteur américain FFTF (Fast Flux Test Facility) ainsi que sur les essais qui y ont été réalisés.

Le stage aura pour but de :

- Faire une étude bibliographique afin de s'approprier le sujet et d'acquérir les compétences nécessaires sur les RNR-Na les accidents et FFTF.
- Prendre en main le code MACARENa initialement développer pour l'étude des ULOF sur le réacteur ASTRID.
- Adapter le code MACARENa pour permettre la simulation d'ULOF sur le réacteur FFTF.
- Comparer les résultats obtenus avec MACARENa aux données expérimentales et aux résultats obtenus avec le code de référence CATHARE.

- Formation souhaitée :

Génie nucléaire, mécanique des fluides, thermique, méthodes numériques

- Durée du stage :

6 mois (à partir de septembre 2026)

- Méthode/logiciel(s):

Matlab/Python, CATHARE

- Mots clés :

RNR-Na, accidents, ULOF, FFTF

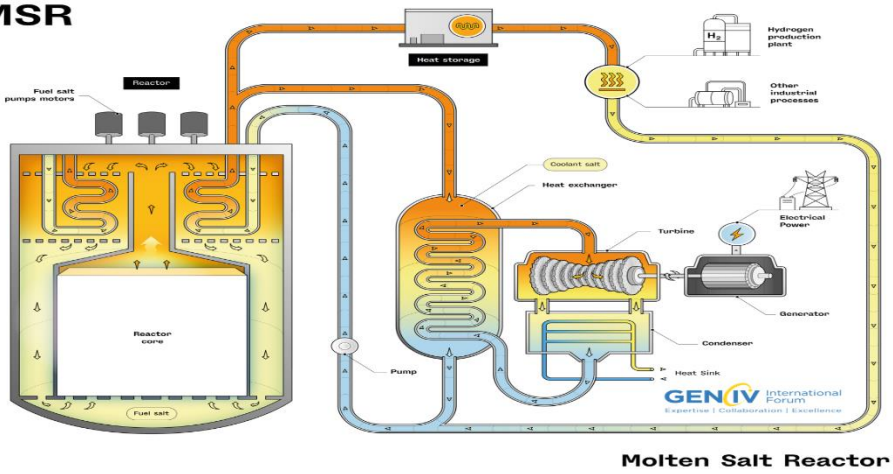
- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Mickaël LE BOHEC, Simon LI
mickael.lebohec@cea.fr
simon.li@cea.fr

MSR



Molten Salt Reactor

Étude des performances et de la sûreté d'un réacteur à sels fondus (MSR) équipé d'un cycle de conversion d'énergie

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Le CEA propose un stage d'ingénieur de 6 mois visant à modéliser et à étudier, avec le code multiphysique CATHARE3, un réacteur à sels fondus équipé d'un système de conversion d'énergie

Les réacteurs à sels fondus (MSR), font partie des concepts de réacteurs nucléaires de Génération IV. Le combustible nucléaire est généralement sous forme liquide, dissous dans un sel en circulation forcée, du cœur aux échangeurs de chaleur. La chaleur récupérée est ensuite convertie en électricité par un système de conversion d'énergie (SCE).

Les MSR ont de potentiels avantages en terme de sûreté et de performances de pilotage (suivi de charge), grâce aux contre-réactions neutroniques, mais le points de solidification élevé des sels implique un risque en cas de refroidissement incontrôlé du combustible. L'étude du fonctionnement et de la sûreté d'un MSR doit donc porter sur l'ensemble du système, du cœur à la source froide. Le code de calcul multiphysique à l'échelle système CATHARE3 permet ce type de modélisation.

Le CEA s'intéresse depuis plusieurs années aux MSR. Les études menées ont abouti au concept du réacteur ARAMIS, utilisant un sel combustible chlorure et à spectre neutronique rapide. A ce stade, le SCE n'a pas été dimensionné, et les études de pilotage et de sûreté n'ont porté que sur la partie nucléaire.

Le stage a donc pour but de produire un jeu de données pour le code CATHARE3 modélisant le réacteur ARAMIS et son SCE, et d'étudier sa dynamique. Pour cela, on s'appuiera sur des jeux de données existant de la partie nucléaire d'ARAMIS, ainsi que de SCE d'autres réacteurs étudiés par le CEA, à savoir les réacteurs à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), un autre concept de Génération IV.

Au cours du stage, il est attendu de :

- Prendre en main le code CATHARE3 et les jeux de données de la chaudière d'ARAMIS ainsi que du SCE de RNR-Na ;
- Proposer des adaptations du jeu de données du SCE de RNR-Na au point de fonctionnement d'ARAMIS, par des études de dimensionnement des composants et du cycle ;
- Coupler les jeux de données CATHARE3 ;
- Etudier avec CATHARE3 le comportement dynamique du système lors d'accidents ou de transitoires de pilotage.

Le stage se déroulera au centre de Cadarache (13) du CEA, à proximité d'Aix-en-Provence. L'unité d'accueil est le Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS) dans l'IRESNE, un laboratoire spécialisé dans la conception et l'étude du fonctionnement-sûreté des réacteurs nucléaires innovants. On y retrouve des compétences en dimensionnement de cycles de conversion d'énergie et des principaux composants, ainsi qu'en modélisation, notamment avec le code CATHARE3.

Les résultats du stage pourraient être valorisés par une publication scientifique, et serviraient de base au développement d'un simulateur de fonctionnement d'un MSR.

Ressources :

Code CATHARE3 : https://cathare.cea.fr

Travaux de thèse présentant le concept ARAMIS : https://theses.hal.science/tel-04851404

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou Master 2 dans le domaine de l'énergie nucléaire, physique ou mécanique des fluides

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Linux, code CATHARE3 (C++), python, Git, logiciels de bureautique

- Mots clés :

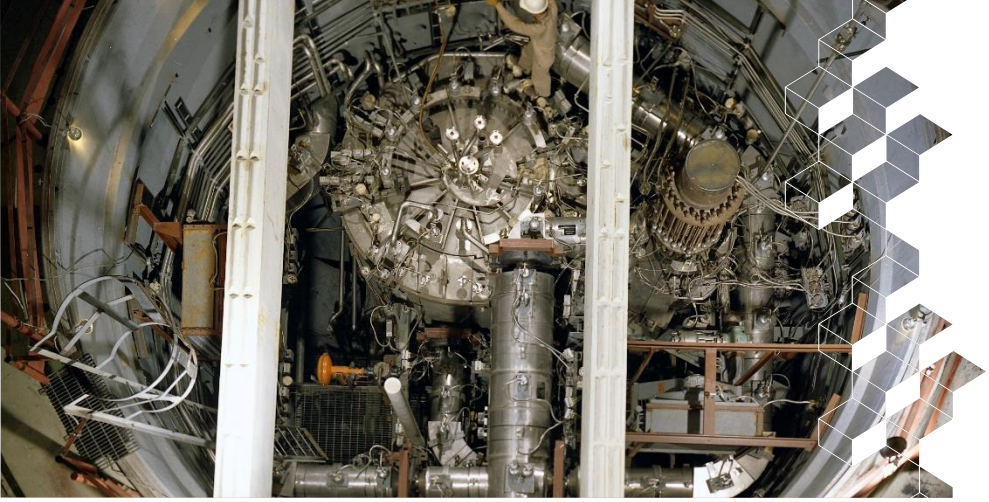
Réacteur à sels fondus, cycles de conversion d'énergie, fonctionnement-sûreté

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Martin MASCARON
martin.mascaron@cea.fr
Laura MATTEO
laura.matteo@cea.fr



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

IRESNE/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 pilote 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 pilote un exercice de comparaison code-à-code sur une série de transitoires de fonctionnement.

Entre 2023 et 2025, de premiers modèles de RSF ont été étudiés avec le code CATHARE3. A partir de ces modèles, le stagiaire sera amené à développer les modèles CATHARE3 des configurations proposées dans l'exercice de benchmark.

Pour chaque transitoire étudié, le stagiaire proposera une comparaison avec l'outil MOSAICS (code de transitoire simplifié adapté au RSF et conjointement développer par le CEA et le CNRS).

Les étapes identifiées ci-dessous seront réalisées :

- Implémentation des propriétés des sels fondus dans CATHARE3 avec les données fournies dans le benchmark.
- Développement par étape des modèles CATHARE3 des configurations à calculer
- Réalisation des transitoires de fonctionnement et comparaisons avec les résultats MOSAICS. Le stagiaire s'efforcera de proposer des modèles analytiques afin de mieux comprendre les écarts.

Au fil de l'eau des activités annexes comme l'utilisation du module 3D de CATHARE3 ou encore l'évaluation de l'impact des incertitudes sur les transitoires pourront être engagées.

Le stage sera réalisé au sein du DER/SESI à l'IRESNE/CADARACHE (Conception et études de fonctionnement des RSF). Des interactions fortes avec les équipes de développement du code CATHARE3 au DM2S sont prévues.

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 (STMF/LTBC)
marine.anderhuber@cea.fr (SACLAY)

Modélisation et étude de la boucle thermohydraulique HERMES-P avec le code de calcul système CATHARE

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Stage dédié à l'étude de la boucle thermohydraulique HERMES-P avec le code de calcul système CATHARE.

La modélisation numérique d'une boucle expérimentale thermo-hydraulique apporte un soutien essentiel aux essais. Tout d'abord, elle vient en support à la conception des composants du dispositif et du plan d'expérience. Une fois validée, elle permet d'évaluer l'écoulement dans l'ensemble de la boucle, notamment à des points dépourvus d'instrumentation.

L'objet de ce stage est la boucle expérimentale HERMES-P, dédiée à la caractérisation thermo-hydraulique et mécanique des assemblages combustible REP à l'échelle 1, et de leurs lignes de commandes (grappe, guide de grappe, mécanismes de commande).

Le stage se déroulera à l'IRESNE au sein du Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI), dans le Laboratoire de pré-Conception et d'Optimisation des Systèmes (LCOS), dédié à la conception, l'évaluation et l'optimisation des systèmes nucléaires. Il impliquera une collaboration avec l'équipe expérimentale du Laboratoire d' Essais et d'études hydro-mécaniques (LETH), qui héberge la boucle HERMES-P.

L'objectif du stage est de modéliser la boucle HERMES-P avec le code de thermohydraulique système CATHARE, code de référence pour l'étude et la conception du parc nucléaire français.

Pour ce faire, vous aurez à :

- Prendre connaissance de la boucle expérimentale HERMES-P (fonctionnement et dimensions) ;
- Prendre en main le code CATHARE ;
- Modéliser la boucle HERMES-P sur CATHARE (création d'un jeu de donnée selon les plans) ;
- Evaluer la cohérence de la modélisation sur la base de résultats expérimentaux ;
- Etudier différents points de fonctionnement de la boucle et configurations géométriques.

Vous serez intégré à une équipe spécialisée en modélisation thermo-hydraulique des systèmes.

Rigueur, curiosité et motivation seront vos meilleurs atouts pour nous rejoindre !

Références :

- IRESNE https://www.cea.fr/energies/iresne/Pages/Accueil.aspx
- Collard B. et al., 'CEA activities in support of the development and qualification of fuel assemblies', 2013

- Formation souhaitée :

Formation ingénieur/master avec spécialité en génie énergétique, nucléaire ou mécanique des fluides/thermique

CATHARE, Codes de calculs système, Linux

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

HERMES-P, REP, Assemblage combustible, CATHARE, Thermohydraulique

- Mots clés :

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

kahina.aithamougandolfo@cea.fr
willstrong.rakotoarison@cea.fr
johann.lecerf@cea.fr
eric.boccaccio@cea.fr

Machine Learning pour la conception de prototypes de systèmes nucléaires

IRESNE/DER/SESI/LCOS

Le stage se déroulera au Laboratoire de préConception et d'Optimisation des Systèmes (IRESNE/DER/SESI), qui est en charge d'études de prédimensionnement de nombreux systèmes nucléaires innovants (chaudières nucléaires, cycles de cogénération, composants pour la sûreté passive…). Le stage aura pour but de développer et d'appliquer une approche de machine learning pour la caractérisation de l'interaction fluide-structure dans les faisceaux de tubes de générateurs de vapeur.

Durant le processus de conception d'un réacteur nucléaire, les systèmes qui le composent sont testés grâce à des **prototypes ou maquettes expérimentales à échelle réduite**. Ces essais à échelle réduite visent à caractériser les performances du composant testé, à mesurer un phénomène physique d'intérêt pour mieux le comprendre ou à améliorer sa modélisation numérique. L'exemple classique est celui d'une maquette d'avion ou de F1 placée dans une soufflerie.

Il est bien connu que le changement d'échelle entraîne souvent des **distorsions** au niveau des **lois physiques** : la grandeur d'intérêt mesurée dans la maquette (e.g. frottement, vitesse critique…) n'est alors pas représentative de celle qui serait mesurée dans le composant réel. Dans certains cas, des méthodes existent pour évaluer plus ou moins facilement de telles distorsions. Toutefois, ce n'est plus possible pour des phénomènes physiques complexes et fortement non linéaires. Dès lors, comment peut-on construire une maquette qui assurera la transposition du phénomène de l'échelle du prototype à celle du réacteur ? Quels paramètres doit-on impérativement conserver lors du design de ce prototype ?

Ce stage propose de participer au développement de la méthode **D4NL** (**Data-Driven Discovery of Dimensionless Numbers and governing Laws**), mise au point récemment au CEA. Les nombres adimensionnels (Reynolds, Prandtl, Nusselt, etc.) sont de premier intérêt pour les problématiques de transposition, de par leur invariance entre les échelles et leur interprétabilité physique. La méthode D4NL ambitionne de retourner la meilleure **corrélation adimensionnelle** construite par machine learning à partir des **grandeurs dimensionnelles** du problème (diamètre d'une conduite, densité d'un fluide, etc.).

Le stagiaire se concentrera particulièrement sur un nouveau cas d'application encore non traité par D4NL : les vibrations, parfois instables, des tubes de générateurs de vapeur sous écoulement. Les étapes du stage seront :

- Etude et compréhension des phénomènes physiques en jeu (interaction fluide-structure, écoulement monophasique…),
- Construction de la base d'apprentissage/test avec les données expérimentales provenant des maquettes d'un autre laboratoire CEA (DIVA/TITAN/AMOVI à Saclay),
- Application de la méthode D4NL dans le but de trouver la corrélation adimensionnelle qui caractérise le mieux la stabilité de l'interaction fluide-structure dans ces essais,
- Raffinement de la méthode si besoin.

- **Formation souhaitée :**

Ingénieur/Master en Génie nucléaire, mécanique des fluides, thermohydraulique.

Appétence souhaitée pour les mathématiques appliquées et la programmation.

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s) :**

Python, Windows/Linux, Matlab, TrioCFD

- **Mots clés :**

Machine Learning, statistiques, thermohydraulique, interaction fluide-structure,

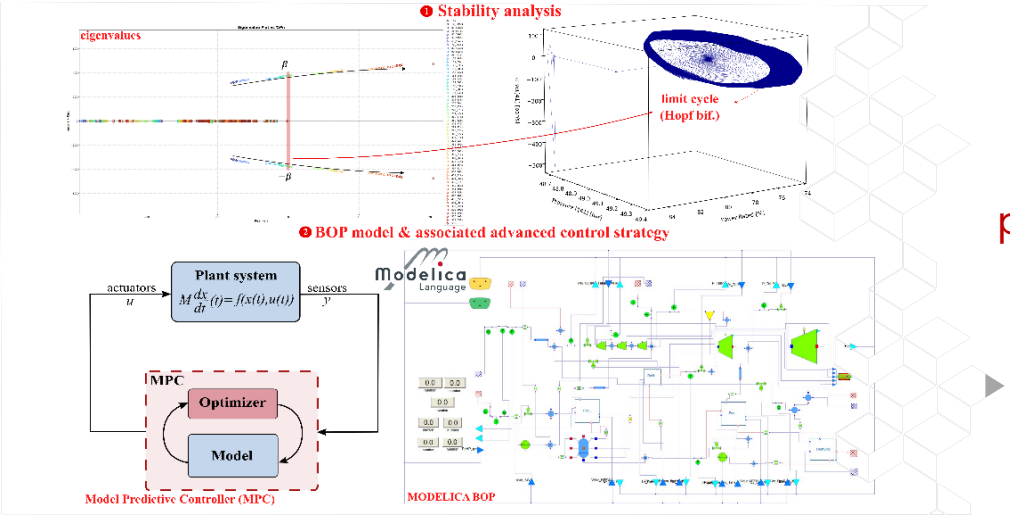
- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact(s) :**

RAZAIRE Camille
camille.razaire@cea.fr

CARDOLACCIA Jérome
jerome.cardolaccia@cea.fr



Simulation du pilotage d'un générateur de vapeur compact associé à un cycle Rankine de production d'électricité et de chaleur: commandes linéaire et avancée (data-driven)

IRESNE/DER/SESI/LEMS

CONTEXTE

Proposé par le Laboratoire d'Etudes et de Modélisation des Systèmes (LEMS) du Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI), ce stage s'inscrit dans le cadre de la R&D menée sur le pilotage performant du Système de Conversion d'Energie (en anglais BOP, Balance Of Plant) associé à un réacteur nucléaire modulaire (en anglais SMR, Small Modular Reactor). Ces réacteurs doivent contribuer à la décarbonation du système énergétique et ainsi participer à l'atteinte des objectifs environnementaux en matière de réduction des émissions CO_2.

OBJECTIF

L'objectif du stage est de contribuer, *par simulation*, à l'étude de stabilité et de contrôle de la dynamique du cycle thermodynamique eau–vapeur mis en œuvre. Le fonctionnement recherché de ce cycle doit en effet répondre au challenge constitué par la combinaison d'une conception compacte du générateur de vapeur et d'une production flexible de cogénération électricité – chaleur (capable de répondre aux services réseaux exigeants imposés par l'intégration des énergies renouvelables à production variable).

PROGRAMME DE TRAVAIL

A l'issue d'une phase d'apprentissage sur le sujet, les approches et outils, le programme du stage s'adaptera aux avancées courantes de l'équipe d'encadrement et comprendra typiquement :

› ***L'exploitation*** *d'un modèle mis a disposition de l'étudiant. Cette étape de simulation consistera e.g. à:*

- La mise en œuvre de techniques de pilotage par commande linéaire de type *Gain Scheduling* par PID, *commande optimale* (LQR/G).
- La réalisation d'études de sensibilité (scénarios) en vue de cartographier les performances et les limites du système (eg. cartes de stabilité).

› ***L'exploration*** *d'approches de pilotage par méthodes de contrôle avancé (prédictive, « data driven » e.g. apprentissage par renforcemcent - en anglais RL, Reinforcement Learning) :*

- Indentification de cas applicatifs de ces méthodes et stratégie de simulations associées (e.g. estimation d'un bruit de mesure et modélisation de la dynamique de la chaîne de mesure, construction d'un métamodèle et/ou correction en ligne par un observateur/estimateur, etc.)
- Evaluation de voies algorithmiques et logicielles
- Construction de cas-tests de démonstration, en s'appuyant sur des objets de type pompe et vanne dont la modélisation dynamique existante pourra être améliorée.

OUTILS

Le stage mobilisera différents outils numériques, tels que le logiciel DYMOLA (langage Modelica), des environnements de programmation Python (et ses bibliothèques libres e.g. d'optimisation), MATLAB, ainsi que des logiciels de la sphère statistique (CEA ou libres d'accès qui sont nombreux).

CANDIDAT

Ce stage est adapté à un(e) étudiant(e) ayant suivi des enseignements sur au moins deux des trois domaines suivants:

1. Energétique - Thermohydraulique
2. Automatique avancé et Optimisation
3. IA: apprentissage - métamodèle.

Les qualités personnelles attendues sont le dynamisme, la rigueur et la curiosité.

ENCADREMENT

L'étudiant retenu pour le stage sera encadré par un doctorant et un ingénieur CEA expert.

LIEU

IRESNE, CEA Cadarache

- **Formation souhaitée :**

3ième année d'école d'ingénieurs ou équivalent

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s) :**

MODELICA, PYTHON
DYMOLA, MATLAB
Logiciels CEA & libres: Optim. & Stat.

- **Mots clés :**

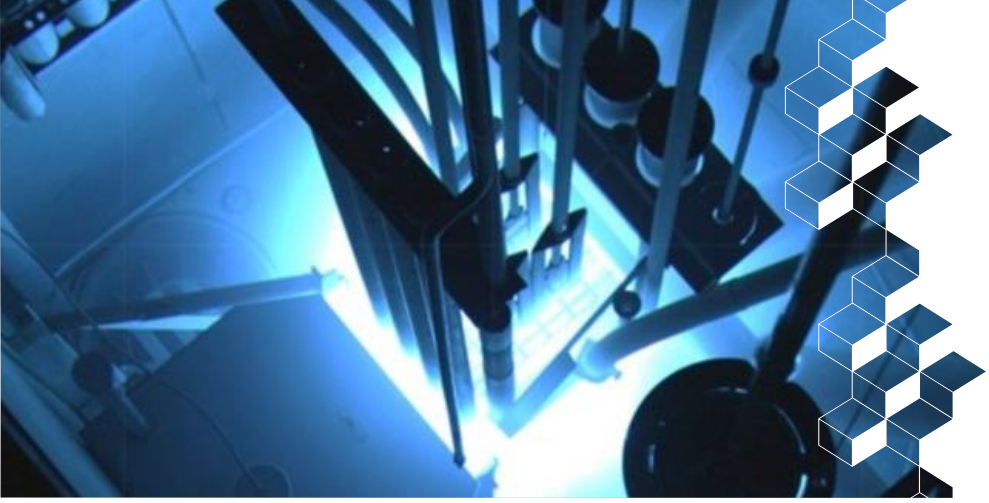
Modélisation, Simulation, Optimisation, Commande optimale, Energétique, Thermohydraulique, Dynamique des systèmes

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact(s) :**

Hugo POLGE, Nicolas ALPY
hugo.polge@cea.fr
nicolas.alpy@cea.fr



Modélisation Multiphysique du Réacteur PULSTAR avec les Codes APOLLO3 pour la Neutronique et CTF et FLICA pour la Thermohydraulique

IRESNE/DER/SESI/LEMS

Stage ayant pour but de contribuer à modéliser le cœur du réacteur expérimental PULSTAR en couplant des outils de calcul de référence de neutronique et de thermohydraulique

Contexte

Situé sur le campus de l'université d'état de Caroline du Nord (NCSU) aux USA, PULSTAR est un réacteur nucléaire expérimental qui possède des caractéristiques technologiques proches des réacteurs à eau légère qui constituent le parc nucléaire français.

On envisage d'instrumenter le cœur de PULSTAR pour obtenir des mesures locales du flux neutronique, de température et de débit. Le CEA collabore avec NCSU pour la préparation de ces futures expériences pour valider ses outils de calculs scientifiques haute fidélité faisant intervenir le couplage entre codes de neutronique et codes de thermohydraulique. Cette validation permettra de quantifier la prédicitivité du couplage.

La modélisation multiphysique est essentielle pour comprendre et prédire le comportement des réacteurs sous différentes conditions opérationnelles et les codes APOLLO3, CTF et FLICA sont des outils de référence dans leurs domaines respectifs. Leur couplage permettra d'obtenir des simulations plus réalistes et précises.

Objectifs

Le stage proposé vise à contribuer à modéliser le cœur du réacteur PULSTAR avec une résolution à l'échelle pastille/sous-canal avec les codes APOLLO3® pour la neutronique et CTF et/ou FLICA pour la thermohydraulique.

Puis à coupler ces modèles afin de simuler de manière précise et fiable les interactions entre les phénomènes neutroniques et thermohydrauliques dans le cœur du réacteur.

Enfin des comparaisons avec des modélisations simplifiées permettront de montrer l'apport des modèles haute fidélité pour la prédiction des mesures locales dans le cœur du réacteur.

Laboratoire d'accueil

Ce stage se déroulera au Laboratoire d'Études et Modélisations des Systèmes (LEMS) du CEA/IRESNE Cadarache. Les compétences de ce laboratoire sont pluridisciplinaires : thermohydraulique, physique des accidents graves, énergétique, thermomécanique et statistiques.

Des itérations avec les équipes du SERMA du CEA Saclay pour la mise en place des couplages et avec NCSU pour l'utilisation de CTF sont possibles.

- Formation souhaitée :

Master 2 ou Ingénieur en Génie Nucléaire ou équivalent

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Codes APOLLO3®, FLICA5, CTF.
Environnement linux.
Programmation Python.

- Mots clés :

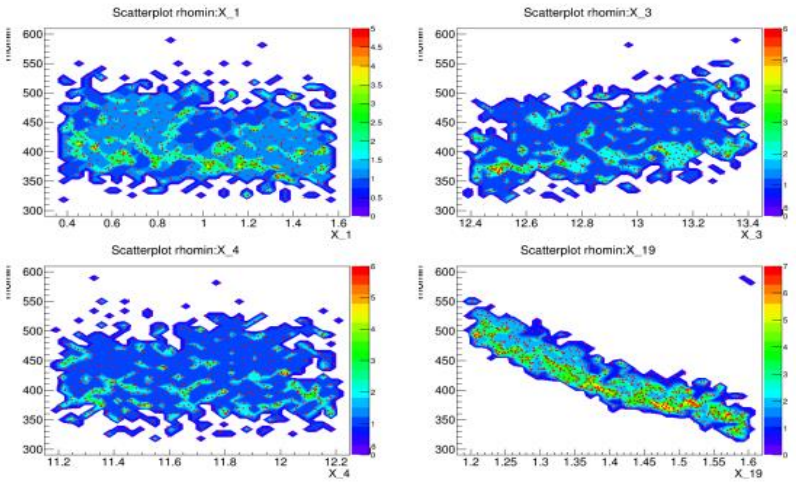
Simulation, multiphysique, neutronique, thermohydraulique

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

DEBOVE Jonathan
jonathan.debove@cea.fr



Modélisation physico-numérique d'un transitoire accidentel dans un réacteur à eau pressurisée (REP) avec une méthode statistique avancée (machine learning)

IRESNE/DER/SESI/LEMS

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une étude multiphysique en soutien au multi-recyclage de combustibles innovants dans les réacteurs à eau pressurisée (REP).

Il sera réalisé au sein du Laboratoire d'Etudes et de Modélisation des Systèmes (LEMS) à l'IRESNE de Cadarache qui compte une équipe multidisciplinaire de chercheurs en thermohydraulique, énergétique et statistiques.

Un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) implique une vidange, une dépressurisation et une vaporisation de l'eau du circuit primaire d'un réacteur nucléaire. Il est usuellement calculé lors des études de sûreté réalisées dans le cadre de la conception et de l'exploitation des réacteurs de puissance civils.

Des études neutroniques menées au CEA ont montré que, pour certains combustibles innovants envisagés pour le futur, certaines configurations pouvaient conduire à une contre-réaction neutronique positive en cas de vidange du modérateur au cours d'un APRP, ce qui est interdit dans le référentiel actuel de sûreté des REP.

Une nouvelle étude multiphysique (thermohydraulique/neutronique) est en cours au LEMS afin d'identifier des configurations réalistes où le potentiel effet de vidange positif de ces combustibles innovants puisse constituer un risque pour la sûreté.

La première étape est d'évaluer grâce à des calculs réalisés avec le code thermohydraulique CATHARE3 les masses volumiques du modérateur atteintes au cours d'un APRP, ainsi que les écarts de masse volumique dans le cœur du réacteur. Pour cela, les conditions et la cinétique d'un APRP étant très variées, la méthodologie statistique avancée ICSCREAM est en cours d'implémentation dans la plateforme de quantification d'incertitudes URANIE afin de réaliser des séries de calculs incluant un traitement statistique des données incertaines du scénario accidentel.

La méthodologie ICSCREAM permet d'identifier, à partir d'un nombre limité de simulations du modèle thermohydraulique, les configurations pénalisantes de paramètres scénario d'intérêt, indépendamment de l'incertitude des autres paramètres d'entrée. Elle combine une étape d'analyse statistique (permettant d'identifier et classer les principaux paramètres d'entrée influents et de réduire la dimension) avec la construction séquentielle d'un métamodèle de type processus gaussien.

Le stage consistera à :

- Acquérir les connaissances sur la thématique et prendre en main les outils,
- Compléter, améliorer, tester et valider l'implémentation de la méthodologie ICSCREAM dans la plateforme URANIE,
- Réaliser l'étude physique d'un transitoire d'APRP dans un REP900 (en géométrie 3D cartésienne) afin d'identifier les configurations conduisant à des masses volumiques faibles du modérateur et des écarts de masse volumique élevées dans le cœur du réacteur.

- Formation souhaitée :

3ème année d'Ecole d'Ingénieur ou Master 2 en génie nucléaire, mécanique des fluides, thermohydraulique, mathématiques appliquées, modélisation numérique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

OS Linux et Windows, code CATHARE3, méthode ICSCREAM, plateforme URANIE, python

- Mots clés :

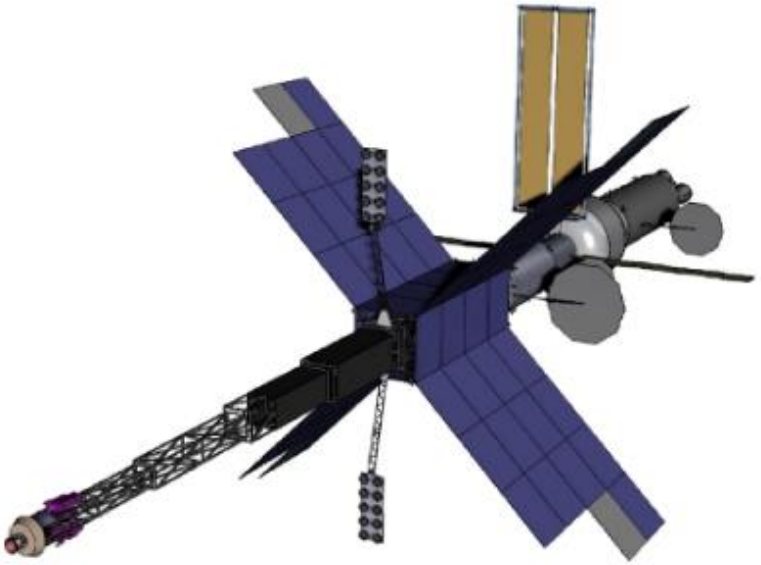
Thermohydraulique diphasique, sûreté, statistiques, machine learning, métamodèle, simulation numérique

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

DUFOUR Emmanuelle
emmanuelle.dufour@cea.fr
PEROT Nadia
nadia.perot@cea.fr



Propulsion nucléaire électrique : études de performances pour des missions vers Mars

IRESNE/DER/SESI/

Le stage proposé a pour objectif d'étudier différentes configurations de propulsion électronucléaires combinées à des moteurs-fusées à combustion. Les études porteront sur l'architecture et les performances du système électronucléaire, les deltaV et trajectoires optimales ainsi que les concepts of operations (CONOPS) les plus performants pour accomplir des mission humaines vers Mars.

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. Un stage réalisé en 2025 a permis de développer, pour la NTP, des configurations optimales (concepts of operations) pour des missions habitées vers Mars et d'en calculer les trajectoires en tenant compte des pertes gravitaires. Le travail proposé en 2026 consistera à étudier un mode de propulsion combiné entre moteurs-fusée classiques (LOX/LH2) et NEP. Afin de définir les performances et la masse sèche du véhicule spatial, il sera en premier lieu utile d'étudier les performances du système électronucléaire et en particulier sa masse spécifique. Cette dernière sera étudiée dans un autre stage pour ce qui concerne le réacteur et le bouclier d'atténuation des rayonnements. Le présent stage, en lien avec le stage centré sur le réacteur, permettra de quantifier la masse du système de conversion d'énergie et du radiateur et plus globalement d'évaluer la masse sèche et les performances du système complet.

La dernière partie du stage consistera à réaliser des études de mission vers Mars et de comparer les performances de la NEP combinée à des moteurs à combustion à la NTP pour une mission vers Mars en conjonction de classe et une autre en opposition de classe.

- **Formation souhaitée :**

Ingénieur aérospatial, mécanique des fluides, mécanique spatiale.

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s) :**

Calculs analytiques, Excel, Python, outils CEA

- **Mots clés :**

Propulsion électrique, Mars deltaV, cycle de Brayton, système éléctronucléaire

- **Possibilité de thèse :**

Oui : Indépendante du stage

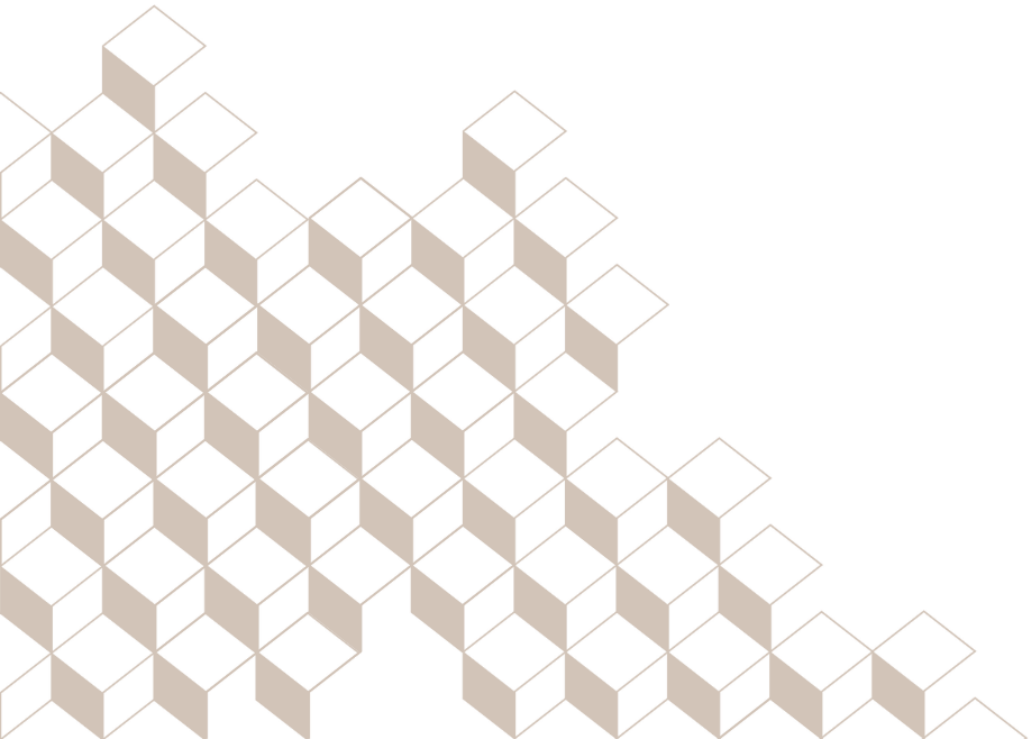
- **Contact(s) :**

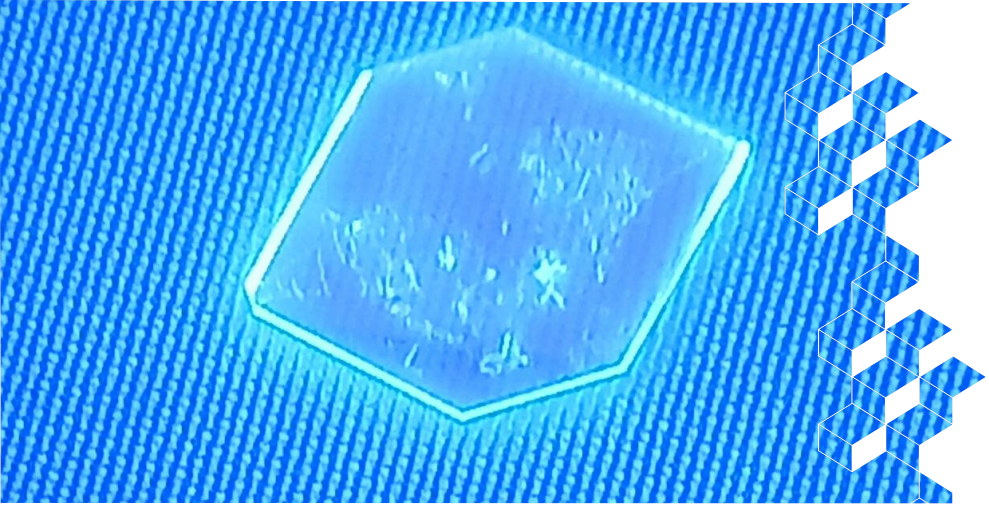
Frédéric BERTRAND
frederic.bertrand@cea.fr

S P E S I

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

Experimental Physics, Safety Testing and Instrumentation Unit





Evaluation des performances de détection d'un flux de neutron avec un scintillateur de type pérovskite organique-inorganique.

DER/SPESI/LDCI

Le LDCI (Laboratoire de Dosimétrie, Capteurs et Instrumentation), composé d'une vingtaine de chercheurs et techniciens, développe l'instrumentation pour les réacteurs nucléaires. 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 dispositifs prometteurs dans le domaine de la détection de neutron rapide notamment, en raison de leurs compositions chimiques ou leurs dopages. 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 la détection de neutrons.

Le stagiaire sera impliqué dans les tâches suivantes :

-Revue de la littérature : Effectuer une revue approfondie des travaux de recherche existants pour la détection de neutrons. Comprendre les principes de fonctionnement des interactions neutron-pérovskite par simulation (SRIM notamment).

-Caractérisation de la détection de neutrons : Mener des expériences de détection de neutrons en utilisant les scintillateurs à base de pérovskite fabriqués par le CEA LITEN. Évaluer les performances de détection, y compris la sensibilité et la linéarité.

-Analyser les données expérimentales et interpréter les résultats obtenus avec des données simulées obtenues avec le code Monte Carlo TRIPOLI4 ou SRIM.

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 3ème année / Master 2

Instrumentation nucléaire, interaction rayonnement-matière, généraliste

- Durée du stage :

4-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4; SRIM; Python

- Mots clés :

Instrumentation, scintillateur, neutron

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

David Tisseur, Olivier Llido
David.tisseur@cea.fr
Olivier.llido@cea.fr

Optimisation de la durée de calcul d'un réseau de neurones sur un réseau Spark appliqué à la détection de bruit neutronique en réacteur

DER/SPESI/LP2E

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une optimisation du réseau de neurones utilisé par l'institut de recherche concernant la détection automatique de bruit neutronique mesuré sur un réacteur à fission nucléaire.

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 (SPESI), 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 (LP2E) 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.

Dans le cadre d'une problématique relative à l'analyse du bruit neutronique mesuré en réacteur, notre Laboratoire a été amené à utiliser des méthodes d'intelligence artificielle et en particulier le calcul d'un réseau de neurones en langage python. Son apprentissage nécessite une durée de calcul très importante sur une machine classique. Nous avons par ailleurs mis en place un réseau local de calcul autour du logiciel de parallélisation Spark.

Le travail proposé consiste à adapter notre code pour qu'il puisse être parallélisé par Spark afin de diminuer les temps de calculs. Le résultat devra ensuite être intégré dans une IHM développée en JAVA pour rendre accessible la création du réseau par les expérimentateurs du laboratoire

- Formation souhaitée :

Bac + 3 ou supérieur – Informatique Industrielle

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

JAVA, R, SQL, python, pySpark, postgreSQL

- Mots clés :

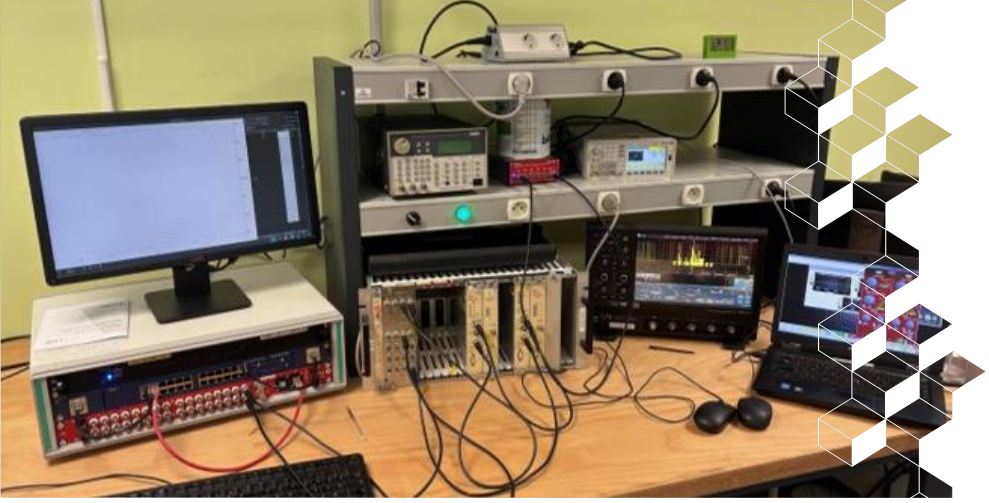
Acquisitions de données, Réseaux de neurones, big data, analyses de données, algorithmique, mathématique

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Laurent Pantera
laurent.pantera@cea.fr



Mise en place d'Intégration Continue (CI) pour un logiciel de mesure nucléaire.

DER-SPESI-LP2E

Les systèmes de mesure nucléaire méritent également de bénéficier de l'Intégration Continue !

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 cinq mois pour mettre en place des procédures d'intégration continue (CI) pour un logiciel de mesure nucléaire.

Ce logiciel pilote un système d'acquisition de données (DAQ) et est régulièrement agrémenté de nouvelles fonctionnalités.

Missions

- Vous analyserez les besoins en intégration continue pour le logiciel
- Vous développerez de nouveaux tests unitaires
- Vous complèterez la bibliothèque de données qui serviront de référence aux tests unitaires
- Vous automatiserez les processus de construction, de test et de déploiement.
- Vous collaborerez avec les équipes de développement pour intégrer les pratiques de CI dans le cycle de vie du logiciel.
- Vous documenterez les processus dans un rapport technique.

Profil recherché

- Vous êtes en dernière année de BUT Informatique
- Vous maitrisez le langage de programmation C++/Qt.
- Vous avez des connaissances solides en développement logiciel et en méthodologies Agile.
- Vous avez des connaissances en gestion de versions avec Git.
- Vous avez la capacité à travailler en équipe et à communiquer efficacement.
- Vous avez un intérêt pour le domaine nucléaire

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 :

Informatique (BUT)

Bac + 3 ou supérieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

C++ ; Qt ; Linux, Gitlab, shell, Word

- Mots clés :

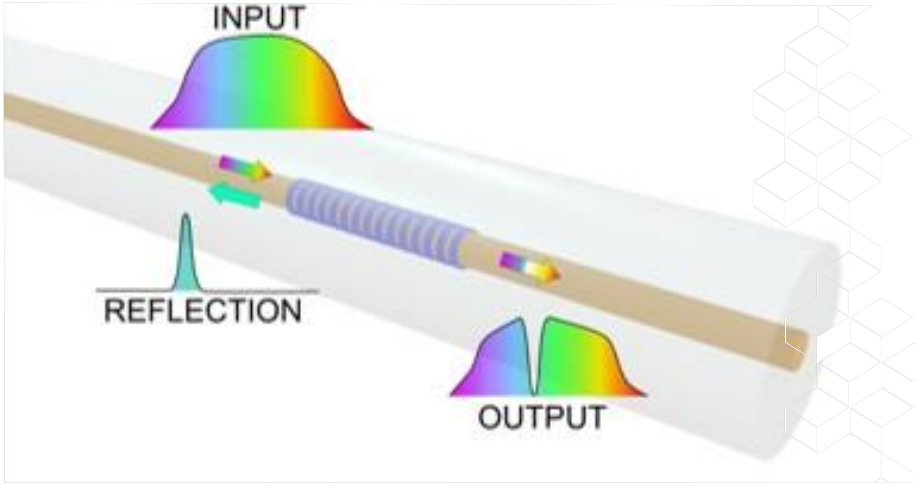
Intégration Continue, Tests unitaires, big data, Automatisations

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Romain Boffy
Romain.boffy@cea.fr



Qualification de Fibres à Réseaux de Bragg pour la Mesure de Température en Réacteur Nucléaire

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 s'approprie de nouvelles techniques de mesure optique pour améliorer la précision et la fiabilité des données expérimentales.

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 (SPESI), 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 (LP2E) 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.

Parmi la quantité de données acquises par les chaines de mesures expérimentales, un grand nombre d'entre elles sont des mesures de température. Dans le réacteur CABRI, celles-ci sont obtenues au moyen de détecteurs ponctuels tels que les thermocouples ou sondes platines.

Une autre technologie d'intérêt pour les mesures de température sont les fibres optiques à réseaux de Bragg qui permettent des mesures distribuées spatialement en utilisant une unique fibre.

Avant de pouvoir utiliser ces techniques optiques pour des mesures en réacteur, il convient de les qualifier en laboratoire et de comparer leurs performances aux détecteurs de référence (thermocouple, sonde) ce qui sera l'objectif de ce stage.

Ce projet se déroulera en plusieurs phases et permettra au stagiaire de développer des compétences en instrumentation en se formant aux mesures de températures fibrées et par thermocouple, ainsi qu'en programmation, analyse de données et statistique. Le déroulé de ce stage comportera cinq grandes parties :

1 - Étude bibliographique sur les mesures par réseau de Bragg ainsi que leurs contraintes en environnement réacteur.

2 - Définition d'un protocole expérimental pour la mesure de température par pyrométrie.

3 - Réalisation des essais en laboratoire selon le protocole défini.

4 – Analyse : traitement des données, calcul des incertitudes, interprétation physique des résultats, proposition d'amélioration du protocole et/ou du banc de mesure.

5 - Rédaction d'un rapport détaillant les résultats obtenus.

- Formation souhaitée :

Grandes Écoles d'Ingénieurs, Master 2

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python

- Mots clés :

Optique, instrumentation, mesure de température, traitement de données

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Marc Pouradier Duteil
04 42 25 88 52
marc.pouradierduteil@cea.fr

Développement et qualification et d'un logiciel d'analyse d'essais transitoires sur le réacteur CABRI

DER/SPESI/LP2E

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une évolution et de la qualification d'un logiciel d'analyse d'essais transitoires réalisés 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 Sûreté et d'Instrumentation (SPESI), regroupe les compétences en exploitation, en physique expérimentale, instrumentation et traitement de données dans le domaine des réacteurs de recherche. Vous intégrez le Laboratoire des Programmes Expérimentaux et d'Essais en sûreté (LP2E) composé de dix ingénieurs-chercheurs permanents. Les activités du laboratoire couvrent la spécification, la préparation, la réalisation et l'interprétation d'essais en réacteur.

Plus particulièrement, notre laboratoire a en charge la conduite de programmes expérimentaux sur le réacteur de recherches CABRI. Ce réacteur aux capacités uniques au monde accueille actuellement des programmes expérimentaux qui portent sur l'étude du comportement thermomécanique de combustible en situation accidentelle.

Ce réacteur est doté d'une infrastructure d'acquisition temps réel connectée aux différentes chaines de mesures expérimentales. L'ensemble des mesures est stocké dans une base de données temporelles de type InfluxDB laquelle est ensuite interrogée pour analyser les essais réalisés.

Un précédent stage a permis de mettre au point un outil d'analyse des transitoires de puissance en réacteur.

Le premier objectif de ce stage sera de faire évoluer cet outil et de le qualifier sur l'ensemble de notre base d'essai par comparaison avec des analyses de référence.

La seconde partie du stage portera sur le développement et la validation de fonctionnalités avancées de cet outil.

- Formation souhaitée :

Bac + 3 ou supérieur – Informatique Industrielle

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

C++, Qt, Linux, réseaux, mesures temps réel, base de données, Python

- Mots clés :

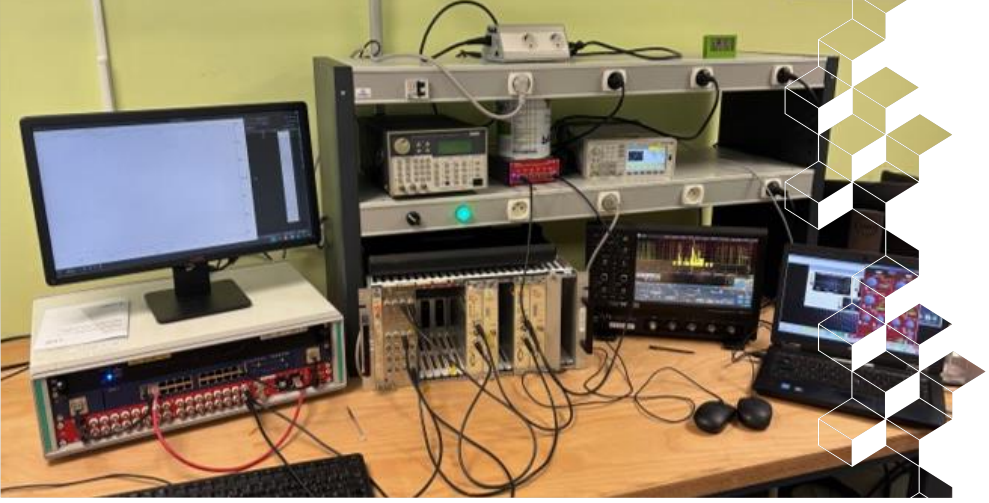
Modularité, interopérabilité, performance, calculs en ligne, big data

- 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



Qualification d'un système de mesure nucléaire

DER-SPESI-LP2E

Rien ne se perd, rien de se crée, vérifiez que « 1 + 1 = 2 », même à 3 millions de coups par seconde.

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 cinq mois axé sur la qualification d'un système de mesure nucléaire.

Cet équipement enregistre des impulsions provenant de détecteurs nucléaires et réalise des analyses en ligne.

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 Mesures Physiques.
- Vous avez un intérêt marqué pour les technologies nucléaires.
- Vous possédez de bonnes compétences en analyse de données et en rédaction de rapports.
- Vous maitrisez les outils informatiques courants (Word) et les logiciels de traitement de données (Excel).
- Vous souhaitez développer vos compétences en analyse de données en découvrant les techniques de comptage 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
comptage nucléaire

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Romain Boffy
Romain.boffy@cea.fr

Supervision du réseau d'acquisition temps réel du réacteur CABRI

DE/SPESI/LP2E

Ce stage s'inscrit dans le cadre 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 Sûreté et d'Instrumentation (SPESI), 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 (LP2E) 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 chaines 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 visera à faire évoluer le logiciel de Supervision actuel écrit en C++/Qt et de modifier les programmes du contrôle/commande écrits en C/LabView CVI.

Ce logiciel devra intégrer des profils de fonctionnement pour paramétrer les chaines 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.

- Formation souhaitée :

Bac + 3 ou supérieur – Informatique Industrielle

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

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

- Mots clés :

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

- Possibilité de thèse :

non

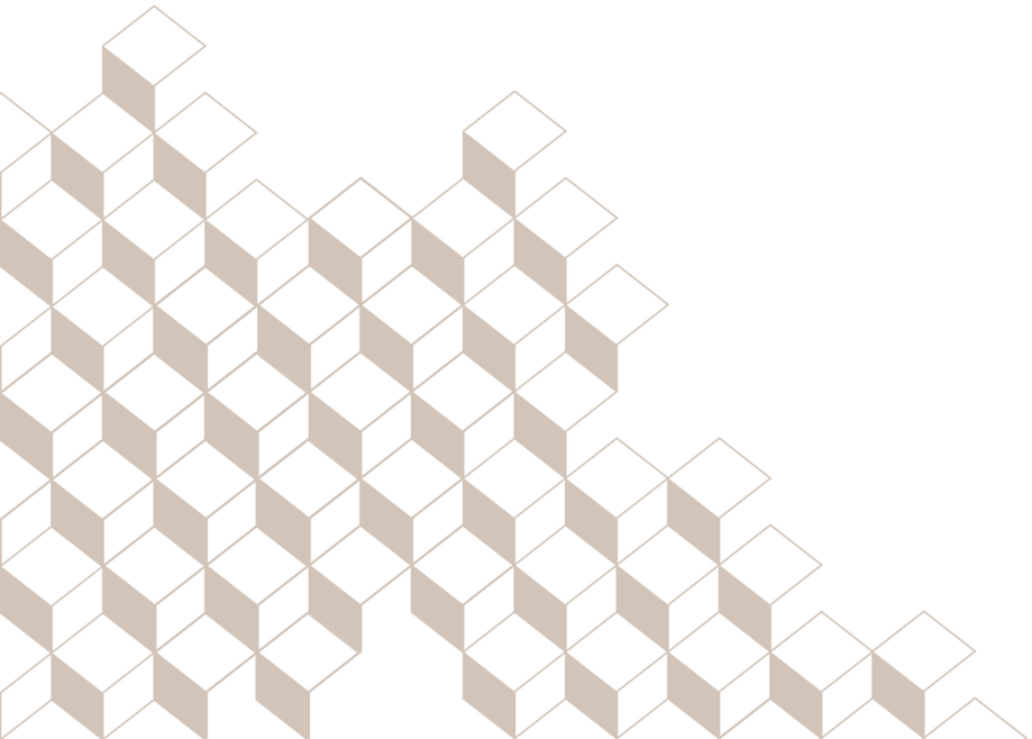
- Contact :

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



Évolution neutronique du cœur RJH

DER / SPRC / LE2C

Calculs d'évolution du combustible du RJH par méthode Monte Carlo en vue de participer à la validation des formulaires de calculs déterministes

Le Réacteur Jules Horowitz (RJH), en cours de construction sur le site de Cadarache, est un réacteur de recherche de nouvelle génération dédié à l'étude des matériaux et combustibles nucléaires sous irradiation. Son cœur est constitué de plaques de combustibles cintrées, arrangées sous la forme d'assemblages cylindriques. Cette forme particulière nécessite d'utiliser des formulaires de calculs spécifiques, pour anticiper le comportement au démarrage du cœur ou pour en assurer son exploitation.

Le formulaire de calcul neutronique dédié au démarrage du réacteur est HORUS3D/N, basé sur l'utilisation des codes de calculs déterministes APOLLO2 et CRONOS2.

La simulation de l'évolution neutronique du cœur est un enjeu majeur pour le suivi de la criticité, la gestion du combustible, la sûreté et l'optimisation des expériences.

L'objectif principal du stage est de modéliser et simuler l'évolution neutronique du cœur RJH au cours d'un cycle d'irradiation, à l'aide d'une méthode de référence basé sur l'utilisation de codes Monte Carlo. Le stagiaire contribuera notamment à :

- Prendre en main les outils de calcul neutronique utilisés au sein du service (APOLLO2 et CRONOS2 au sein du formulaire HORUS3D/N, le générateur automatique de géométries nommé GADGET, TRIPOLI-4®, SERPENT2).
- Mettre en place une modélisation réaliste du cœur du RJH en conditions nominales.
- Réaliser des calculs d'évolution pour suivre les paramètres neutroniques (flux, spectre, réactivité, taux de combustion...).
- Étudier l'impact de différents facteurs (position des barres de contrôle, configuration du cœur, compositions initiales).
- Comparer les résultats de calcul de référence avec des résultats obtenus à l'aide du formulaire HORUS3D/N.

Cette étude sera l'occasion pour le stagiaire de travailler sur un projet concret, dans un environnement de recherche nucléaire. Ce stage permettra de développer une maîtrise des outils de simulation neutronique, ainsi que la compréhension fine du fonctionnement du RJH et de ses enjeux scientifiques.

Le profil recherché est celui d'un(e) étudiant(e) en école d'ingénieur ou en Master 2, spécialité physique nucléaire, génie atomique, modélisation/simulation, ayant des connaissances en physique des réacteurs et neutronique. Une première expérience en simulation avec des codes de calcul serait un plus. Ce stage nécessitera autonomie, rigueur et capacité à travailler dans un environnement scientifique exigeant.

- **Formation souhaitée :**

Master 2 ou 3ème année d'école d'ingénieur

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

APOLLO2, CRONOS2, TRIPOLI4, SERPENT2

- **Mots clés :**

Simulation neutronique ; calculs d'évolution

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

Géraud PRULHIERE
geraud.prulhiere@cea.fr

Conception neutronique d'un réacteur nucléaire à propulsion électrique pour les applications du spatial

DER / SPRC / LE2C

Le stage, d'une durée de 6 mois, consiste à étudier différents concepts de réacteurs nucléaires à propulsion électrique (NEP) dans le contexte de missions spatiales de natures variées.

Le nucléaire promet de nombreuses applications dans le domaine du spatial : propulsion nucléaire thermique (NTP), électrique (NEP) ou encore alimentation via des générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (GTR). Dans ce contexte, le CEA est impliqué dans un projet de conception d'un réacteur nucléaire à propulsion électrique.

Les missions spatiales envisagées pour la NEP sont de natures très variées – vol habité, transport de marchandises, lunaire ou martienne, à des distances et pour des durées variables – tout comme le sont les besoins électriques associés, compris entre la dizaine de kilowatts et le mégawatt. L'objectif de ce stage est de réaliser des études de conception neutronique sur un large panel de concepts, en fonction des besoins associés à chaque mission, et sur la base de critères comme la nature du combustible – du HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) ou du HEU (High-Enriched Uranium) – la géométrie du cœur, l'utilisation d'un cycle direct ou de caloducs qui influencent le choix du caloporteur, les matériaux utilisés pour le contrôle de la réactivité et pour les boucliers de radioprotection, etc. Le nucléaire spatial impose des contraintes spécifiques sur la conception neutronique du cœur – limites sur les masses embarquées, gestion des situations accidentelles, radioprotection – que le stagiaire devra prendre en compte dans son travail.

Après une étude bibliographique sur les concepts de cœur de réacteurs spatiaux présentés dans la littérature, le stagiaire devra réaliser des études paramétriques permettant de déterminer les choix technologiques compatibles avec les missions spatiales prédéfinies avec son encadrement. Dans ce cadre, il sera en mesure de comparer les performances des concepts de NEP étudiés par rapport à d'autres moyens de propulsion, chimique ou NTP. Ce stage sera réalisé en collaboration avec un autre stagiaire du service des systèmes innovants de Cadarache qui abordera cette question du point de vue du système entier. Ces échanges permettront à l'étudiant d'aborder les problématiques d'autres disciplines, et de réaliser des remontages de ses concepts de cœur.

Pour modéliser ses géométries de cœur, l'étudiant pourra s'appuyer sur les codes stochastiques TRIPOLI4 et SERPENT.

De formation bac+5 en ingénierie / génie atomique / aérospatial, vous possédez un goût prononcé pour la conception de cœurs de réacteurs innovants. Ce stage permettra d'effectuer des travaux dans les domaines de la neutronique / physique des réacteurs nucléaires, dans le cadre d'un processus de R&D.

- Formation souhaitée :

Master 2, 3ème année d'école d'ingénieurs, spécialité nucléaire ou aérospatiale

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI4 / SERPENT

- Mots clés :

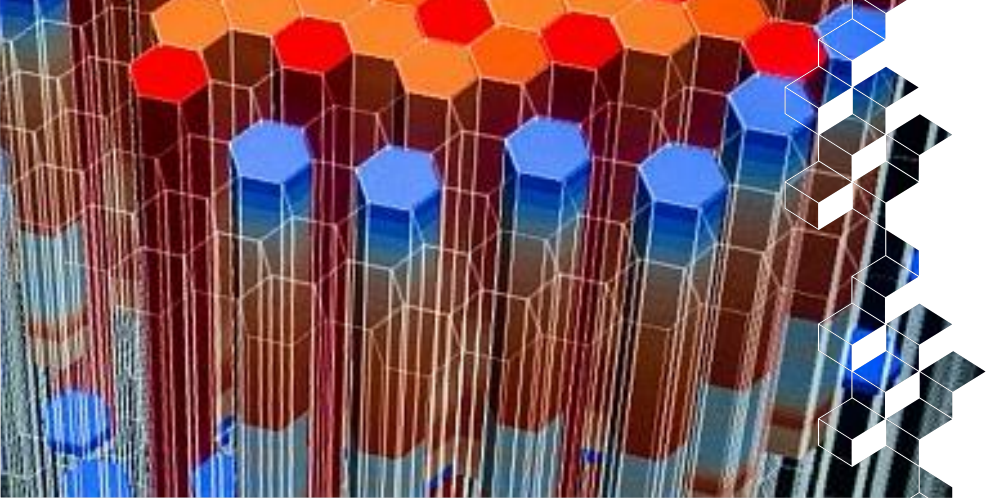
Réacteurs spatiaux, neutronique

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

PETITEAU Vincent
vincent.petiteau@cea.fr



Développement d'un formulaire pour l'exploration et l'optimisation de cœurs de réacteur à neutrons rapides

DER/SPRC/LE2C

Lors de ce stage, vous aurez l'occasion de :

- **Réaliser des calculs neutroniques à l'aide du code déterministe APOLLO3 et son interface utilisateur INCA**
- **Entraîner des métamodèles de type réseaux de neurones pour la construction d'outils neutroniques simplifiés**
- **Participer à l'élaboration d'une plateforme de préconception multiphysique de réacteurs à neutrons rapides en support à la fermeture du cycle**

Les réacteurs à neutrons rapides de génération IV doivent répondre à différents objectifs : sûreté renforcée, gestion améliorée des matières, réduction des coûts. L'atteinte de ces objectifs est complexe car la conception réacteur doit concilier différents domaines : neutronique, thermohydraulique, thermomécanique, physique du cycle, technico-économie etc…

Une approche envisagée est le couplage de modèles simplifiés des différentes disciplines afin de pouvoir explorer efficacement l'espace des conceptions possibles, et ainsi identifier les tendances de conceptions les plus prometteuses. Une fois les conceptions identifiées, des études plus détaillées pourront être réalisées pour converger vers un remontage complet du réacteur.

La mise en place de cette approche nécessite le développement d'outils simplifiés par thématique. Cette offre de stage s'inscrit dans cette nouvelle démarche de conception. Le but de ce stage est le développement d'un formulaire permettant la création d'outils simplifiés de neutronique compatibles avec les autres disciplines. Ce formulaire reposera sur le code de neutronique déterministe APOLLO3 et son interface utilisateur INCA. Les modèles simplifiés prendront la forme de métamodèles, comme les réseaux de neurones par exemple, générés par la plateforme URANIE.

Lors de ce stage, le stagiaire sera amené à travailler dans un laboratoire d'étude de conception neutronique. Des discussions en interface avec des laboratoires de physique du combustible et de thermohydraulique seront organisées au cours du stage, offrant une opportunité unique d'avoir une vision globale de la conception de réacteur. Les travaux réalisés durant ce stage seront valorisés dans le cadre des réflexions en cours sur la fermeture du cycle.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python. Il devra faire preuve de dynamisme et de curiosité.

- Formation souhaitée :

3ème 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 :

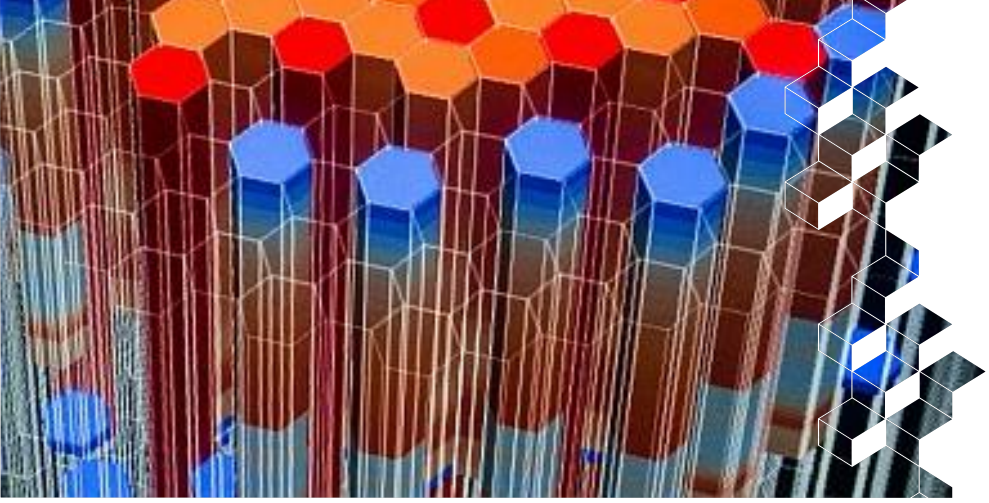
Non

- Contact :

TIREL Kévin / PETITEAU Vincent

kevin.tirel@cea.fr

vincent.petiteau@cea.fr



Modélisation neutronique de poisons consommables pour les études du cycle combustible

DER/SPRC/LE2C

Lors de ce stage, vous aurez l'occasion de :

- **Faire des calculs paramétriques à l'aide du code de calcul déterministe APOLLO3**
- **Faire des calculs de scénarios électronucléaires avec le code de référence COSI7**

Afin de quantifier l'impact de l'usage des poisons neutroniques sur la production de colis vitrifiés de déchet.

La France a adopté une stratégie de monorecyclage de l'uranium et du plutonium, et prévoit dans le futur de se diriger vers leur multirecyclage. Le recyclage des matières consiste à retraiter le combustible irradié pour en séparer les matière valorisables des produits de fission et des actinides mineurs, ces derniers étant conditionnés dans des colis de déchets vitrifiés. La prévision de la production de colis de déchets vitrifiés sur le long terme est essentielle pour assurer une gestion responsable des matières nucléaires.

Pour augmenter les performances des réacteurs à eau sous pression (REP), des poisons consommables peuvent être ajoutés dans le combustible. Les poisons consommables sont des éléments qui absorbent les neutrons au cours de l'irradiation et aident à réduire l'excès de réactivité en début de cycle. A la fin de l'irradiation, ces poisons consommables et les produits qui en découlent se retrouvent dans le combustible irradié. Ce stage s'intéresse à l'impact des poisons consommables sur les colis de déchets vitrifiés produits.

Ce stage se déroulera en deux phases. La première phase consistera à obtenir des compositions de combustibles irradiés contenant différentes fractions de poisons consommables. Pour ce faire, des calculs de neutronique seront réalisés à l'aide du code déterministe APOLLO3 à l'échelle réseau.

La seconde phase consistera à réaliser des calculs de scénarios électronucléaires simples à l'aide de l'outil de référence CEA COSI7. Un calcul de scénario est une modélisation dynamique du cycle combustible qui permet de simuler toutes les infrastructures nécessaires au bon fonctionnement d'une flotte de réacteurs nucléaires, depuis l'extraction du minerai d'uranium jusqu'à la production de déchets. Ces calculs de scénario devront permettre de quantifier l'impact de l'utilisation de poisons consommables sur la production de déchets vitrifiés.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python, avoir des connaissances de physique des REP et faire preuve de dynamisme et de curiosité.

- Formation souhaitée :

3ème 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 :

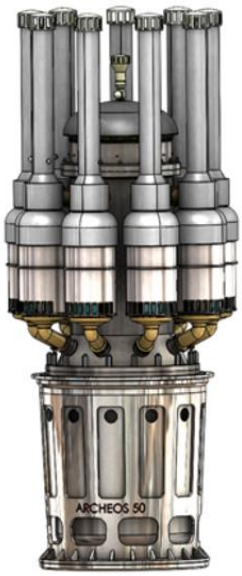
Neutronique, code déterministe, poison consommable, cycle du combustible, REP

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

EUSTACHE Aimeric / TIREL Kévin
aimeric.eustache@cea.fr
kevin.tirel@cea.fr



© CEA

Démarrage d'un réacteur à eau légère avec le chauffage nucléaire et la circulation naturelle

DER / SPRC / LE2C

DER / SESI / LEMS

Stage de 6 mois orienté vers la neutronique, la thermohydraulique, et le couplage entre ces deux disciplines

Plusieurs concepts récents de Small Modular Reactors (SMR) à spectre thermique reposent sur une circulation de l'eau en convection naturelle dans le circuit primaire, y compris en fonctionnement normal, pour augmenter la sûreté intrinsèque (NuScale, Calogena, Archeos, LDR-50…). L'absence de pompe primaire demande l'adoption de nouvelles procédures pour le chauffage de l'eau. Leur phase de démarrage sera alors différente de celle des REP (Réacteurs à Eau Pressurisée).

Dans les REP, la divergence se fait à chaud afin de maximiser (en valeur absolue) le coefficient de température modérateur (CTM). Ce coefficient stabilisant est important pour assurer la sûreté intrinsèque du réacteur. La présence du bore dans l'eau tend à minimiser le CTM surtout à faible température, d'où la nécessité de chauffer l'eau avant de diverger.

Pour les REB (Réacteurs à Eau Bouillante), les conditions de démarrage dépendent de la conception. Dans plusieurs cas il est préférable de s'approcher des conditions de fonctionnement nominales avant de diverger afin de s'appuyer sur l'effet stabilisant du vide (bulles de vapeur). En particulier, si l'efficacité des grappes est maximale à froid, la divergence sera interdite à froid afin de minimiser l'impact d'un accident de retrait de grappe.

Le stage vise à simuler la phase de démarrage d'Archeos : un SMR calogène à convection naturelle sans bore soluble. Le but étant d'étudier la possibilité d'une divergence à froid et du chauffage de l'eau avec la chaleur nucléaire. En effet, l'absence du bore dans le modérateur est favorable à une divergence à froid. Les circuits primaire et secondaire sont conçus pour fonctionner en régime d'écoulement monophasique, ce qui minimise le risque d'instabilités. L'efficacité des grappes sera à étudier.

Des simulations couplées neutronique/thermohydraulique sont alors nécessaires. Plusieurs modélisations sont envisagées : une modélisation du système entier avec le code CATHARE3 pour la thermohydraulique et CRONOS2 pour la neutronique, et une modélisation fine du cœur avec FLICA5 pour la thermohydraulique et APOLLO3 pour la neutronique. La simulation des transitoires de démarrage visera à vérifier la stabilité de l'écoulement et de la puissance tout au long de cette phase. Elle vise aussi à identifier les phases critiques vis-à-vis des critères de sûreté (marge à la crise d'ébullition, coefficients de contre-réaction, efficacité des grappes).

Ce stage sera l'opportunité pour l'étudiant de travailler dans plusieurs disciplines telles que la neutronique, la thermohydraulique, et le couplage entre les deux. Il nécessitera un profil orienté vers la physique des réacteurs nucléaires et la simulation numérique.

- **Formation souhaitée :**

Master 2, 3ème année d'école d'ingénieurs

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

APOLLO3 / FLICA5 ou CATHARE3

- **Mots clés :**

Couplage neutronique thermohydraulique

- **Possibilité de thèse :**

Oui

- **Contacts :**

IBRAHIM Marcelle
marcelle.ibrahim@cea.fr

PETITEAU Vincent
vincent.petiteau@cea.fr

OLITA Paolo
paolo.olita@cea.fr

Création d'une base de données pour l'entraînement de modèles d'apprentissage automatique en physique des réacteurs

DER/SPRC/LE2C

L'avènement de l'apprentissage automatique ouvre de nouvelles perspectives sur la manière d'aborder les problèmes scientifiques, en exploitant mieux l'énorme volume de données disponibles. Afin de tirer pleinement parti de ces nouvelles possibilités, les informations existantes doivent être réexaminées sous un nouvel angle. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier, d'extraire et de formater les caractéristiques pertinentes dans des bases de données. Ce stage offrira l'opportunité de réaliser cette tâche dans le domaine de la physique des réacteurs, depuis l'analyse fonctionnelle jusqu'à la construction de la base de données.

Au sein du CEA Cadarache, le Département d'Études des Réacteurs mène des travaux de recherche avancés sur les réacteurs actuels et futurs, en s'appuyant sur des outils de simulation de haute fidélité pour la neutronique, la thermo-hydraulique et la dynamique des réacteurs.

Avec l'essor de l'intelligence artificielle, de nouvelles perspectives s'ouvrent pour l'amélioration des modèles, l'accélération des simulations et l'exploitation optimale des données de calcul. L'apprentissage automatique, en particulier les réseaux de neurones profonds, nécessite cependant des bases de données bien structurées, riches et adaptées aux problématiques physiques traitées.

Le stage aura pour objectif principal de concevoir et de construire une base de données dédiée à l'entraînement de modèles d'IA dans le domaine de la physique des réacteurs. Le ou la stagiaire participera notamment aux tâches suivantes :

Analyse des besoins en données pour différents cas d'usage (prédiction de champs neutroniques, réduction de modèles, approximation de solveurs, etc.).

Sélection et traitement de données issues de codes de calcul du CEA tels que :

- TRIPOLI-4® (neutronique stochastique Monte Carlo)
- APOLLO3® (neutronique déterministe)
- INCA (interface de modélisation)

Structuration de la base de données (formats : HDF5, NetCDF, Parquet ou autres).

Mise en place de scripts d'automatisation pour l'extraction, le nettoyage et la validation des données.

(Optionnel) Réalisation de premiers tests d'apprentissage sur un cas d'étude simple.

Des compétences en base de données et une disposition pour le travail en autonomie sont demandées. Le candidat sera amené à travailler dans un environnement multidisciplinaire ; les capacités de communication, d'échange et de synthèse seront appréciées.

- Formation souhaitée :

Master II

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4®, APOLLO3®, INCA

- Mots clés :

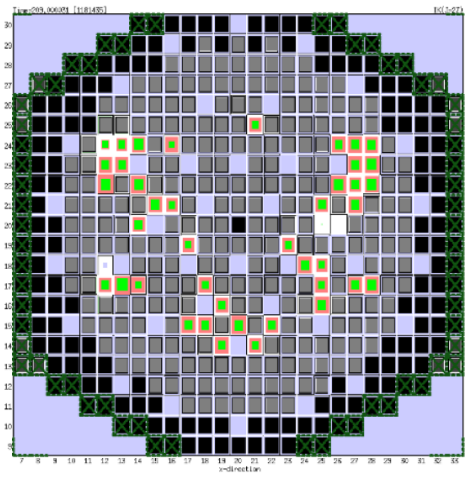
Base de donnés, machine learning, méthodes numériques

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

GUADAGNI Ettore / VALOCCHI Giorgio
Ettore.GUADAGNI@cea.fr
Giorgio.VALOCCHI@cea.fr



Mise en œuvre de schémas de calcul neutronique avancés avec le code APOLLO3® 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 de Physique (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 utilisées 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® pour le traitement des états dégradés, et des premiers travaux ont montré sa faisabilité. Ce projet de stage a pour objectif d'adapter ce schéma aux différents niveaux de dégradation des assemblages, en fonction des informations retournées par le code de thermohydraulique SIMMER-V de la plateforme SEASON, étape préalable au couplage neutronique-thermohydraulique entre APOLLO3® et SIMMER-V.

La première partie du travail consistera à prendre en main la plateforme SEASON pour se familiariser avec les sorties du code SIMMER-V en vue de leur exploitation par APOLLO3®.

La deuxième partie du travail visera à interfacer en langage python les sorties de SIMMER avec la maquette du schéma APOLLO3®.

La troisième partie consistera à adapter le schéma de calcul APOLLO3® en fonction des paramètres précisant le niveau de dégradation fournis par SIMMER pour chacune des mailles de calculs.

- **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

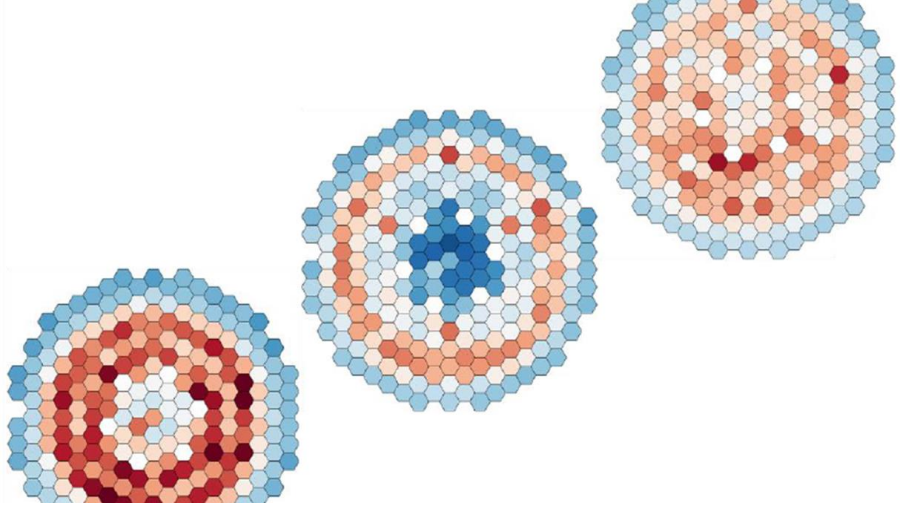
- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

VIDAL Jean-François

jean-francois.vidal@cea.fr



Validation des sensibilités couplées Boltzmann/Bateman en contexte de modification du plan de chargement

DER/SPRC/LEPh

La validation des Outils de Calcul Scientifique (OCS) pour des phénomènes liés à l'évolution du combustible nécessite le calcul de sensibilités couplées Boltzmann/Bateman. Le calcul de ces sensibilités nécessite de réaliser un calcul sur l'ensemble de la plage d'irradiation du combustible et sa mise en place en contexte de changement de position des assemblages est d'une complexité qui nécessite la mise en place d'une procédure spécifique.

Le développement des futurs réacteurs repose sur des méthodologies de conception s'appuyant largement sur les outils de calcul scientifique (OCS). Pour garantir leur capacité de prédiction, ces codes doivent être validés expérimentalement sur l'ensemble des phénomènes possibles et pour toutes les technologies de réacteurs ciblées, en tenant compte des différents biais et incertitudes associés. Cette démarche globale est désignée sous le terme VVQI (Vérification, Validation et Quantification des Incertitudes). Un des enjeux majeurs de cette démarche est d'identifier des expériences représentatives de tous les phénomènes susceptibles de se produire lors du fonctionnement normal et accidentel d'un réacteur, et ce, tout au long de sa durée de vie, notamment en présence de combustible irradié.

La démarche de VVQI nécessite donc d'être en capacité d'obtenir une valeur de référence comparable à l'expérience, mais nécessite surtout une évaluation rigoureuse des biais et incertitudes liés aux hypothèses de calcul et aux données d'entrée. Pour ces dernières, il est possible en neutronique de recourir à une approche perturbative qui permet de calculer toutes les sensibilités aux données d'entrée en un seul calcul et d'utiliser ces sensibilités pour estimer l'incertitude due à ces mêmes données. Pour des quantités d'intérêt liées à l'évolution du combustible (sections efficaces, rendements de fission, énergie de capture et de fission, etc.), il est nécessaire d'utiliser la Théorie des Perturbations en Évolution (TPE) récemment développée dans le code déterministe développé au CEA, APOLLO3®.

L'utilisation de ce formalisme dans le cadre de la modélisation d'une expérience d'irradiation réelle implique, dans la plupart des cas, des mouvements d'assemblages irradiés et des ajouts d'assemblages neufs dans le cœur (modification du plan de chargement) , ce qui complexifie le calcul des sensibilités.

L'objectif du stage est donc de mettre en place la procédure permettant de réaliser une évolution directe et adjointe en présence de changements du plan de chargement sur une configuration simplifiée. Cette procédure sera ensuite validée par rapport à des perturbations directes des données d'entrée et l'impact de considérer une modification du plan de chargement sur les sensibilités et l'incertitude pourra être étudié en parallèle.

La maîtrise de cette procédure pourra ensuite être utilisée pour calculer les sensibilités de configurations de plus en plus complexes jusqu'à des configurations expérimentales.

- Formation souhaitée :

3e année d'école d'ingénieur ou Master 2

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Système d'exploitation Linux

Connaissance en Python et C++

- Mots clés :

Physique des réacteurs, Neutronique, outils de simulation, sensibilité

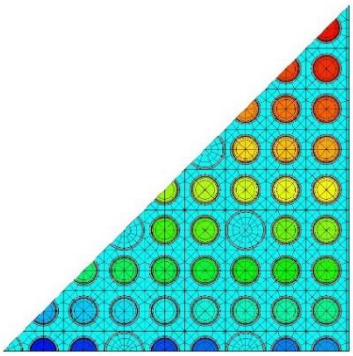
- Possibilité de thèse :

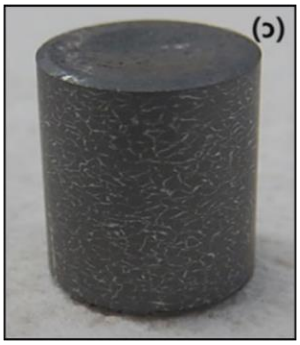
Non

- Contact :

VIALLON Victor

victor.viallon@cea.fr





Analyse neutronique de l'effet de l'ajout d'additifs dans la pastille UO_2 ATF

DER/SPRC/LEPh

Suite à l'accident de Fukushima en 2011, la communauté internationale a travaillé au développement des ATF (Advanced Technology Fuels) pour améliorer la sûreté des centrales nucléaires. Les améliorations des concepts combustibles comportent l'ajout d'additif (métal ou céramique) dans la pastille, ce qui peut faire évoluer le comportement neutronique de l'ensemble. Le stage porte sur une analyse neutronique de la performance d'un assemblage combustible chargé avec des ATF combustibles et étudie l'effet de l'ajout de différents additifs sur différents paramètres d'intérêt.

Différents concepts ATF sont étudiés à l'international et au CEA pour améliorer le comportement du combustible en cas d'accident et assurer la sureté des centrales. Les améliorations dans les pastilles combustibles visent à améliorer la conductivité thermique, pour réduire les températures de fonctionnement et augmenter la marge à fusion en cas d'accident, ou à augmenter la rétention des gaz de fission et à minimiser l'interaction pastille-gaine. Ces améliorations sont obtenues avec l'ajout d'additifs de type céramique ou métallique dans la pastille. Le choix du matériau est un compromis principalement entre : pénalité neutronique, conductivité thermique, stabilité thermochimique sous irradiation.

Le sujet de stage a lieu dans le cadre d'une collaboration entre le SESC (Service d'Étude et de Simulation du Comportement des Combustibles du CEA) et le SPRC (Service de Physique des Réacteurs et du Cycle). Il se focalise sur l'analyse neutronique de l'ajout de ces additifs dans les pastilles d'un assemblage combustible des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) sur la performance en réacteur en fonctionnement nominal.

Les études porteront sur l'analyse de l'effet sur la longueur du cycle, la distribution de puissance dans la pastille, l'évolution du facteur de multiplication en fonction du burnup, etc…

L'étude sera effectuée avec les logiciels APOLLO3® et TRIPOLI4®. Le stage permettra d'apporter des informations complémentaires pour la sélection de l'additif le plus adapté pour améliorer le comportement en accident des concepts combustibles actuels en garantissant la même performance en fonctionnement nominal.

Des compétences en neutronique et une disposition pour le calcul scientifique sont demandées. Le candidat sera amené à travailler dans un environnement multidisciplinaire ; les capacités de communication, d'échange et de synthèse seront appréciées.

- Formation souhaitée :

Master II en neutronique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4®, APOLLO3®, INCA

- Mots clés :

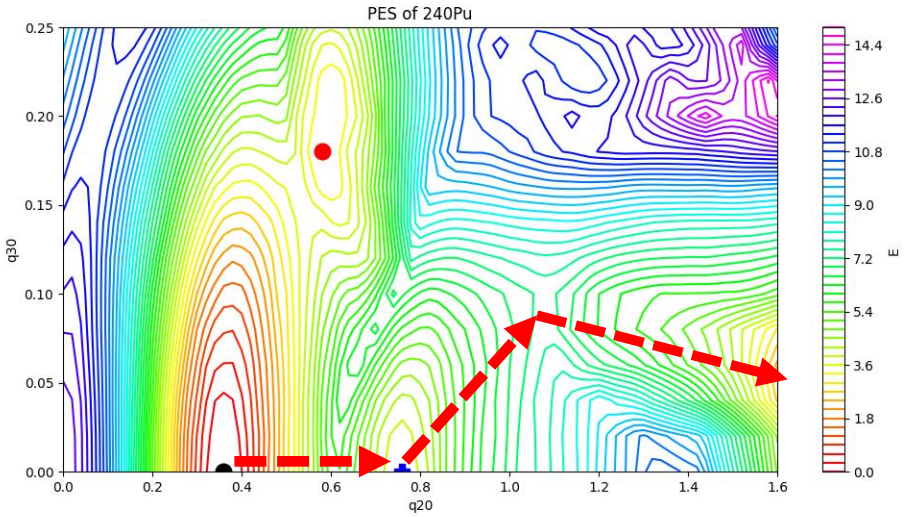
neutronique, combustible, méthodes numériques

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

TOMMASI Jean / D'AMBROSI Veronica
jean.tommasi@cea.fr
veronica.dambrosi@cea.fr



Nuclear fission modes and fragments in a multidimensional deformation space

Building on the pioneering work of Bohr and Wheeler [1], we can explain the wide variety of fission yields observed along the nuclear chart as differences in the structure of the associated potential energy surface. This surface is not observable and cannot be measured, but we can calculate it using a variety of nuclear models. During the fission process, the nucleus changes shape, causing a corresponding change in its potential energy, since the Coulomb and surface energies depend on the nuclear shape. The interplay between these two quantities gives rise to a landscape of valleys and ridges, depending on the deformation parameter used to describe the nuclear shape. We can imagine the nuclear wavefunction moving over this landscape, taking different paths that lead to different fission fragments. The objective of this stage is to implement a simple random walk algorithm to explore the various paths over a multidimensional potential energy surface, which is built using the finite-range liquid-drop model.

At the end of the calculations, we will have a variety of path leading to different fission fragments, to each path we can assign a statistical weight according to its contribution to the final fission yelds. We then use each individual path to calculate neutron transmission coefficient, but instead of using a single path based on the minima energy, we can use the statistical ensemble with its own statistical weights.

[1] N. Bohr and J. A. Wheeler, Physical Review 56, 426 (1939).

- Formation souhaitée :

University (physics degree)

- Durée du stage :

3 months

- Méthode/logiciel(s):

Fortran 90

Python

- Mots clés :

Metropolis alghoritm

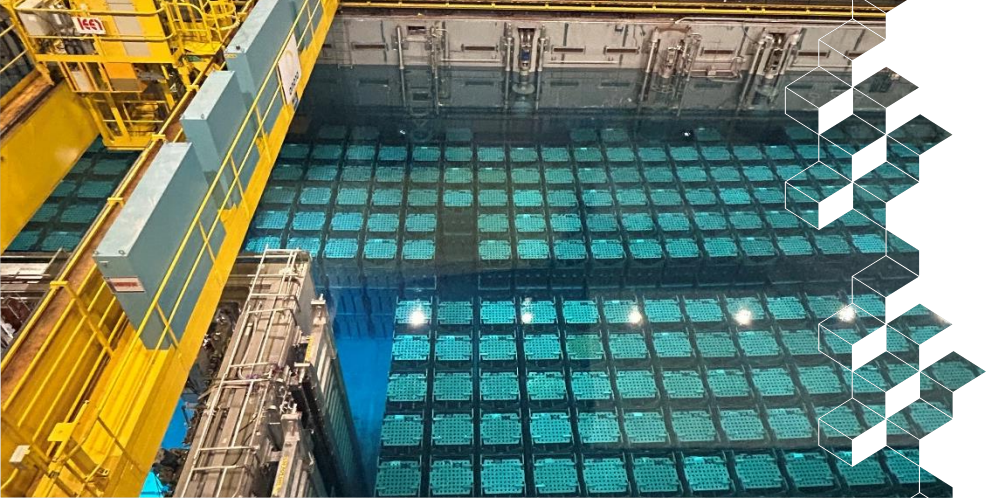
Potential energy surfaces

- Possibilité de thèse :

Yes

- Contact :

Alessandro Pastore
Alessandro.pastore@cea.fr



Vers une exploitation optimale et robuste de la base de validation expérimentale de l'Outil de Calcul Scientifique CRISTAL pour la sûreté-criticité

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'affiner la compréhension d'éléments méthodologiques visant à exploiter 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 permettant d'éviter le risque de réunir les conditions d'amorçage et d'entretien de réactions de fission en chaîne. Elles sont réalisées à partir d'outils tels que l'Outil de Calcul Scientifique (OCS) CRISTAL. Un dossier de vérification et de validation est associé à ces OCS regroupant, notamment, des éléments démontrant leur capacité à reproduire des résultats expérimentaux représentatifs des configurations d'application. La diversité des applications rencontrées en criticité (type de milieu fissile, géométrie, etc.) peut amener les industriels à traiter des configurations peu ou pas représentées dans le dossier de validation, obligeant à tenir compte de marges supplémentaires. La validation des OCS, et son applicabilité aux différentes configurations industrielles, représente une des problématiques majeures en sûreté-criticité. Une méthode, dite de transposition, permet de tirer profit des éléments de la validation expérimentale afin d'estimer les biais et incertitudes de calcul dus aux données nucléaires sur le coefficient effectif de multiplication.

L'utilisation d'un grand nombre d'expériences de la base de validation nécessiterait en toute rigueur la connaissance 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, semblent démontrer que la détermination de ces dernières peut s'avérer impossible pour un grand nombre d'expériences historiques.

La méconnaissance de cette grandeur pouvant amener a une mauvaise interprétation des résultats de transposition, une solution serait d'étudier de possibles 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.

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/rejet 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 déterministes 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 :

3eme 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

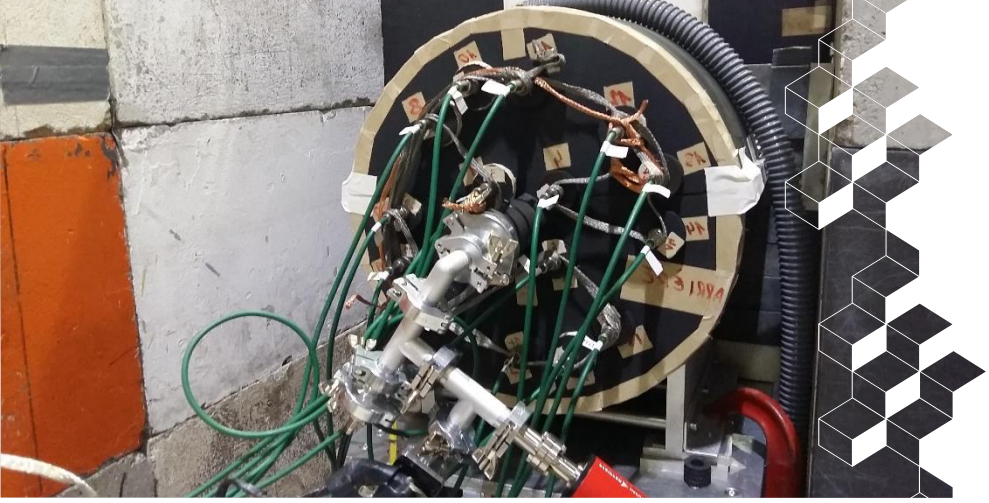
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

NICOL Tangi/CARMOUZE Coralie

tangi.nicol@cea,fr,
coralie,carmouze@cea,fr



Contribution à l'analyse des mesures de rendement de neutrons retardés, par fission thermique de l'U233, de l'U235 et du Pu239

DER/SPRC/LEPh

Les neutrons retardés jouent un rôle essentiel dans le contrôle des réacteurs nucléaires, mais leurs caractéristiques précises restent encore imparfaitement connues. Dans le cadre du projet ALDEN, une campagne expérimentale a été menée en juin 2025 à l'Institut Laue-Langevin afin d'obtenir de mesurer les paramètres du 241Pu. Au cours de cette expérience, quatre chambres à fission (U-233, U-235, Pu-239 et Pu-241) ont été utilisées pour mesurer le taux de fission avec différents observables. Le stage proposé vise à analyser ces données, à comparer les résultats obtenus et, si nécessaire, à développer une modélisation pour optimiser la précision de la mesure.

Les neutrons retardés sont une très faible fraction des neutrons émis suite au processus de fission. Leur cinétique d'émission relativement lente rend possible le pilotage des réacteurs nucléaires au moyen d'éléments de contrôle.

Depuis plusieurs années, le CEA est engagé dans la mesure précise des données physiques qui caractérisent l'émission des neutrons retardés. Ces mesures se déroulent à l'Institut Laue Langevin de Grenoble au moyen du détecteur « LOENIEv2 » et d'une cible de matériau fissile isotopiquement pure, soumise à un flux de neutrons de très basse énergie.

L'analyse de ces mesures passe par la détermination du taux de fission au cours de l'irradiation, au moyen de diverses méthodes : mesure du flux d'irradiation, utilisation d'une chambre à fission ou détermination du nombre de neutrons prompts émis par fission.

L'objectif de ce stage est d'inter-comparer ces méthodes, du point de vue de leur compatibilité statistique.

L'étudiant participera en particulier à l'analyse de données acquises en juin 2025 sur des cibles d'U235, U233 et Pu239 pour lesquelles les trois méthodes de mesure du taux de fission ont été appliquées.

Au cours de la campagne expérimentale, plusieurs séries de mesures ont été effectuées pour chaque isotope, dans des conditions expérimentales variées (flux neutronique élevé, flux atténué, mesures de taux de comptage, mesures en énergie avec deux dispositifs différents). Ces approches multiples ont permis de constituer des jeux de données complémentaires, présentant toutefois des différences de structure, de codage et de format selon l'outil ou la méthode employés. L'objectif du stage sera de mettre en cohérence l'ensemble de ces données, d'identifier les points de convergence et les éventuelles divergences, puis de réaliser une analyse comparative globale. Cette démarche offrira une vision d'ensemble des performances et des limites de chaque méthode de mesure du taux de fission.

Le stage débutera par une étude bibliographique destinée à se familiariser avec le dispositif expérimental, les réactions nucléaires mises en jeu ainsi que les méthodes couramment employées pour la mesure du flux neutronique.

Dans un second temps, l'étudiant(e) réalisera une analyse approfondie des données expérimentales, en s'appuyant sur différents outils de traitement (Python, C++, Matlab…), choisis en fonction de ses compétences et préférences.

Enfin, une phase d'interprétation et de comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes sera menée, ouvrant la voie à une possible valorisation sous forme de publication scientifique dans une revue à comité de lecture qui permettra à l'étudiant de mettre en avant sa contribution à un projet de recherche.

- Formation souhaitée :

Bac+5 (ingénieur en 3e année ou Master 2), avec une spécialisation en physique nucléaire, neutronique et/ou instrumentation

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Matlab, Python, TRIPOLI-4, c++, Root

- Mots clés :

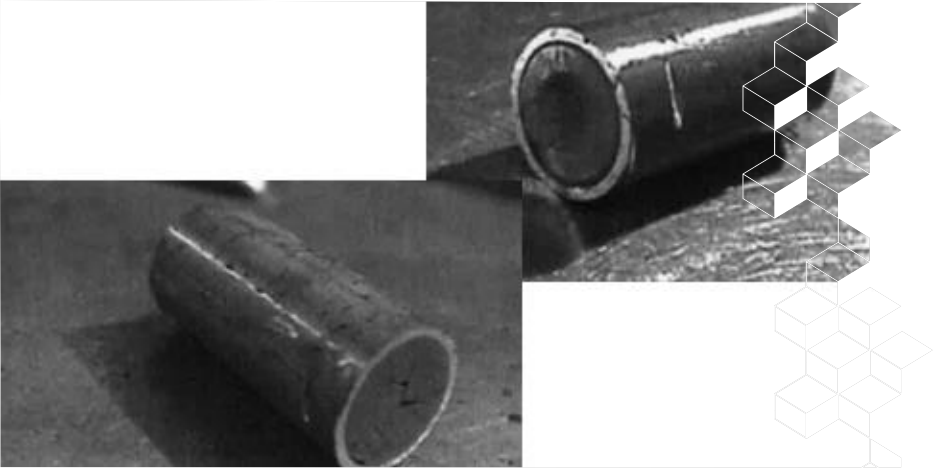
Donnée nucléaires, taux de fission, mesure neutron, dosimétrie, chambre à fission

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

LECONTE Pierre
pierre.leconte@cea.fr



Influence des déformations des assemblages de combustible sur l'inventaire isotopique en fin d'irradiation

DER/SPRC/LEPh

Au cours de l'irradiation, les assemblages de combustible sont susceptibles de se déformer, notamment sous l'effet du grandissement de la gaine et des tubes guides. L'objectif du stage est de modéliser ce phénomène, du point de vue neutronique, et quantifier son influence sur l'inventaire isotopique.

L'estimation de l'inventaire isotopique en fin d'irradiation des assemblages de combustible repose sur des simulations neutronique (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 l'inventaire isotopique est d'importance pour les évaluations de sureté. Les concentrations isotopiques en fin d'irradiation sont une donnée d'entrée notamment des études de criticité et d'échauffement (via la puissance résiduelle).

L'Outil de Calcul Scientifique (OCS) DARWIN a pour objet l'évaluation de l'inventaire isotopique des combustibles. Notamment des combustibles des réacteurs à eau pressurisé (REP) du parc français. DARWIN s'appuie sur les codes de calculs APOLLO2 (pour la modélisation du transport des neutrons au niveau assemblage) et PEPIN2 (pour le calcul des concentrations isotopiques).

La validation des résultats de DARWIN repose sur des analyses de crayon combustible irradié (ou PIE: Post-Irradiation Examination). Des tronçons de crayon (figure ci-dessus) sont dissous et les actinides et produits de fission en solution sont mesurées par spectroscopie de masse.

Le sujet de stage proposé concerne la prise en compte du phénomène de déformation des assemblages de combustible et son impact sur le calcul des concentrations des radionucléides d'intérêts. Usuellement, de telles déformation ne sont pas modélisées. Assemblage et crayon de combustible sont représentés avec des réseaux réguliers.

Dans un premier temps, les déformations au niveau de l'assemblage pourront être prise en compte en faisant varier l'espace inter-assemblage.

Les déformations au niveau du réseau de crayon seront ensuite abordées et une méthodologie de modélisation sera à établir. Pour cela une géométrie simplifiée (3 x 3 crayons par exemple) pourra être retenue.

L'objectif principal du stage est de quantifier l'influence des déformations du combustible sur des isotopes d'intérêt pour le cycle.

- 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):

Déterministe (APOLLO2 ou 3), Monte-Carlo (TRIPOLI-4)

- Mots clés :

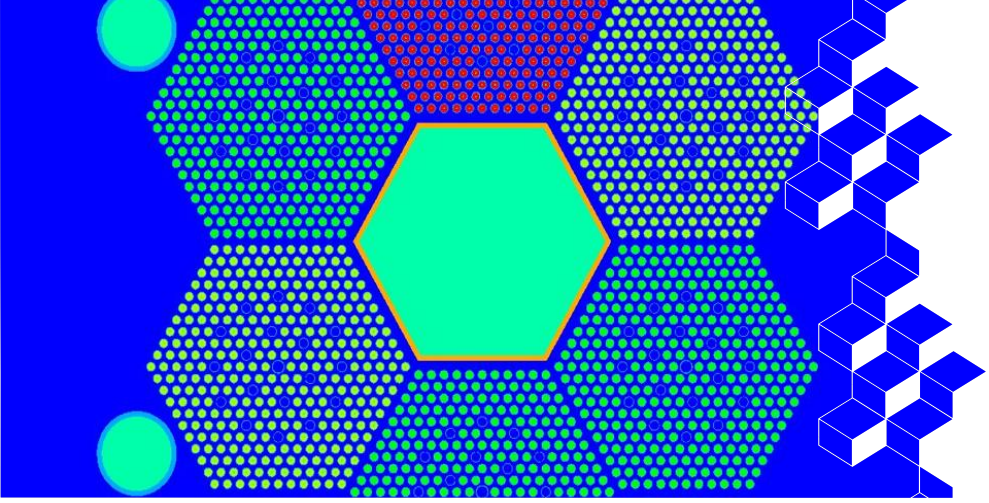
Cycle du combustible, PIE, validation, arcure

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

JABOULAY Jean-Charles
jean-charles.jaboulay@cea.fr



Validation des fonctionnalités de calcul de perturbation exacte dans l'outil de calcul LAST pour l'estimation d'incertitudes technologiques sur des calculs de réacteur

DER/SPRC/LEPh

Dans le cadre du projet POSEIDON, la méthode des perturbations exactes sera utilisée pour calculer l'effet en réactivité théorique des échantillons de produits de fission. LAST, une maquette de code de calcul Monte-Carlo, développé initialement pour tester de nouvelles fonctionnalités de couplage fort entre un code de transport stochastique et un code de physique nucléaire (CONRAD), propose cette fonctionnalité. Pour cela, l'outil exploite la méthode des probabilités itérées de fission (IFP) afin d'estimer les variations d'un paramètre neutronique (par exemple la réactivité) consécutives à la variation d'une ou plusieurs données nucléaires microscopiques (par exemple les paramètres de résonance).

Cette proposition de stage s'inscrit dans le cadre du projet POSEIDON qui porte sur la mesure de section efficace des principaux produits de fission contributeurs à la perte de réactivité des combustibles irradiés. Ce programme consiste en la mesure par oscillation de l'effet en réactivité d'échantillons d'isotopes séparés, couplée à la mesure par activation neutronique, dans trois configurations du cœur (thermique, REP et épithermique). Dans ce cadre, l'outil LAST sera utilisé pour calculer l'effet en réactivité théorique des échantillons de produits de fission grâce à la méthode des perturbations exactes développée dans l'outil.

Dans le cadre de ce stage, on explorera les capacités offertes par l'outil pour des calculs de perturbation exacte, mettant en jeu des variations de géométrie et/ou de matériaux. Cette méthode offre des potentialités intéressantes pour calculer rapidement et de manière précise l'effet d'une variation des données technologiques décrivant le cœur sur sa réactivité.

Le stage se déroulera par étapes de complexité incrémentale :

- Dans un premier temps, le stagiaire réalisera la modélisation en géométrie ROOT de différents benchmarks analytiques pour lesquels il éprouvera les fonctionnalités de calcul de perturbation du code LAST, en comparaison de calculs préalablement réalisés avec le code TRIPOLI4®. Seront analysés les écarts entre codes de calcul, les performances en termes de temps de calcul, le profil de convergence, ainsi que l'ergonomie de mise en œuvre par rapport aux solutions actuelles.
- Dans un second temps, le stagiaire étudiera le cas d'une expérience réalisée dans le réacteur EOLE (cœur UH1.2 du programme EPICURE) pour laquelle il estimera par méthode perturbative l'incertitude associée à la variation du pas de réseau, de la concentration en matière fissile ou de variation des dimensions de crayons.
- Dans un dernier temps, le stagiaire évaluera la capacité de l'outil à traiter des expériences de variation de réactivité réalisées par la méthode d'oscillation dans le réacteur MINERVE, en benchmarkant les fonctionnalités du code LAST par rapport à des résultats précédemment acquis avec les codes TRIPOLI4® et MCNP6.

- Formation souhaitée :

Master ou dernière année d'Ecole d'ingénieur en Physique Nucléaire

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

C++, Python

- Mots clés :

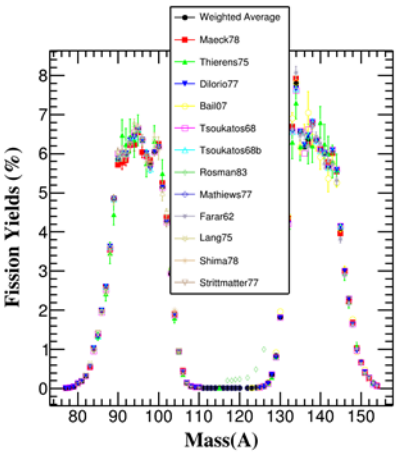
Simulation, neutronique, validation numérique

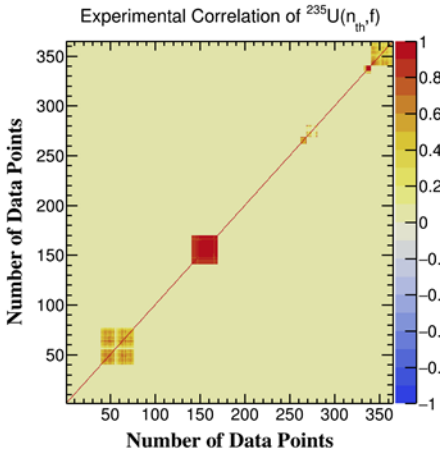
- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Combe Colas Rodolphe
Rodolphe.combe@cea.fr





Développement et amélioration des outils d'évaluation des rendements de fission : applications à la réaction $^{241}Am(n_{th},f)$

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 leur application dans le cadre de l'évaluation des rendements de fission de $^{241}Am(n_{th},f)$

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 de 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. Ces mesures sont réalisées grâce au spectromètre LOHENGRIN, située à l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble. Ces efforts expérimentaux ont conduit à une amélioration substantielle de la qualité des données, qui alimentent désormais les bases de données nucléaires utilisées à l'échelle internationale. Néanmoins, ces données expérimentales seules ne suffisent pas à elles-mêmes pour faire 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.

Les outils actuels, majoritairement en langage C++, nécessitent aujourd'hui une refonte structurelle afin d'en améliorer la qualité logicielle, la maintenabilité et de favoriser leur réutilisation dans divers contextes scientifiques. Le stage vise à adopter une architecture orientée objet, claire, modulaire et évolutive, apte à intégrer de nouvelles méthodologies d'évaluation. Une fois cette modernisation accomplie, l'objectif est d'étendre les fonctionnalités de l'outil, en y intégrant de nouvelles méthodes d'évaluation afin d'enrichir les capacités analytiques existantes. Cette évolution vise notamment à permettre son utilisation dans le cadre de l'évaluation des rendements de fission de l'$^{241}Am(n_{th},f)$.

Objectifs du stage

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 :

- Refondre l'architecture logicielle de l'outil en C++, en adoptant une approche orientée objet permettant une meilleure clarté, modularité et extensibilité.
- Améliorer la qualité de l'outil, tant du point de vue technique (lisibilité, robustesse, bonnes pratiques) que fonctionnel (facilité d'utilisation, autonomie d'exploitation).
- Accroître l'autonomie de l'outil, en facilitant son appropriation par d'autres chercheurs ou ingénieurs, au sein du CEA.

En parallèle de ces développements, le (la) stagiaire sera amené(e) à :

- Se familiariser avec les fondements physiques nucléaires et leur rôle central dans l'évaluation des données nucléaires.
- Appliquer des méthodes d'analyse statistique (traitement des incertitudes, matrice de corrélations expérimentales et évaluées, …etc) sur des données expérimentales complexes.
- Participer à la validation et à la qualification des résultats produits par l'outil.

Profil recherché

Les compétences suivantes sont particulièrement souhaitées :

- Maîtrise du langage C++ et des principes de programmation orientée objet
- Connaissances de base en analyse statistique (incertitudes, ajustements, corrélations)
- Intérêt marqué pour les applications nucléaires et les problématiques de modélisation et simulation scientifique
- 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 :**

M1/M2, 2A/3A d'école d'ingénieur, avec une spécialisation en physique nucléaire, physique des réacteurs ou mathématiques appliquées.

- **Durée du stage :**

4 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

C++, ROOT

- **Mots clés :**

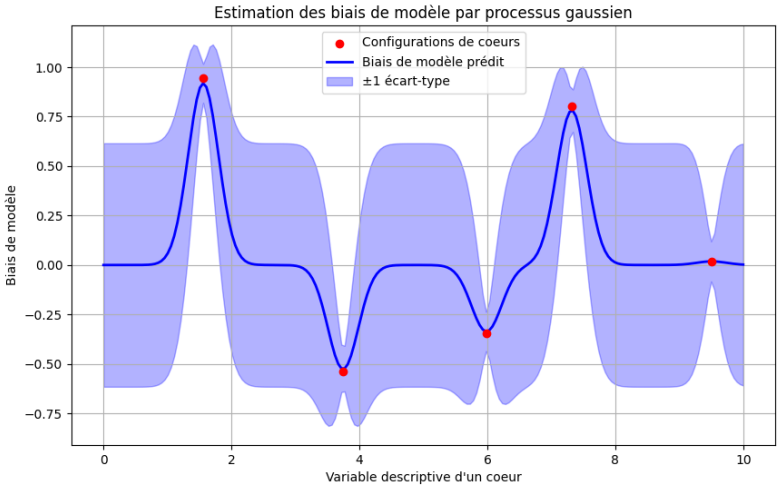
Physique nucléaire, Rendement de fission, Analyse statistique

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

Cheikh Sidi-Mohamed
Kessedjian Grégoire
Sidi-Mohamed.CHEIKH@cea.fr
Gregoire.KESSEDJIAN@cea.fr



Application de Machine Learning à l'étude des biais de modèles pour les calculs de cœurs de réacteurs innovants

DER/SPRC/LEPh

Avec le développement de plusieurs concepts de réacteurs de génération IV, le champ d'application des outils de calcul s'élargit, entraînant la nécessité d'étendre le domaine de validation pour la constitution des outils de simulation en support à d'éventuels dossiers de sûreté. Le stage propose de compléter ces travaux par l'application d'une nouvelle méthodologie se basant sur l'utilisation d'apprentissage artificiel.

La démonstration de sûreté est une étape capitale de la mise sur le marché de nouveaux réacteurs. Elle permet de prouver que le réacteur étudié peut être exploité en garantissant la sécurité des personnes et de l'environnement. Dans le cadre plus spécifique de la neutronique, il s'agit de garantir le bon contrôle de la réactivité du cœur en situation nominale et accidentelle. Pour cela, des outils de calcul scientifique comme APOLLO3® ou TRIPOLI4® sont utilisés. Ils permettent de simuler le comportement du cœur et leurs résultats sont associés à un biais (écart systématique) et une incertitude (méconnaissance des données d'entrée), qui permettent de définir les marges de sûreté appliquées par les industriels.

Pour les réacteurs innovants, et plus particulièrement des réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb, la détermination du biais et de l'incertitude associés aux résultats des codes déterministes présente des difficultés majeures. La méthodologie classique qui consiste à comparer le résultat de la simulation avec celui donné par une expérience n'est pas applicable car il existe peu ou pas d'expériences adaptées. Seule la quantification du biais de modèle (le modèle contenant l'ensemble des approximations, discrétisations, et méthodes de résolution utilisées) est accessible. Pour la validation expérimentale, les marges de sûreté appliquées a priori peuvent donc être rédhibitoires en ce qui concerne l'exploitation de ces réacteurs.

Explorer de nouvelles méthodes complémentaires à celles existantes pour la détermination des bais et incertitudes associés aux résultats de simulations de codes déterministes présente donc un grand intérêt pour les acteurs du nouveau nucléaire.

Au cours de ce stage le biais de modèle d'un outil de calcul déterministe sera étudié comme une fonction de plusieurs variables descriptives d'un cœur de réacteur nucléaire (sections efficaces macroscopique, indices de spectre, etc.). En appliquant des méthodes de Machine Learning à ce problème sur une base de données d'expériences, il faudra déterminer une approximation de cette fonction, pour ensuite l'appliquer au cas du réacteur étudié (réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb) et obtenir ainsi une estimation de son biais de modèle.

La suite du stage consistera à s'affranchir des variables descriptives et déterminer une nouvelle fonction « estimation du biais de modèle » grâce à des méthodes de Deep Learning.

- Formation souhaitée :

Mathématiques appliquées, Master 2
ou École d'ingénieur

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python,
Machine Learning,
Base de données

- Mots clés :

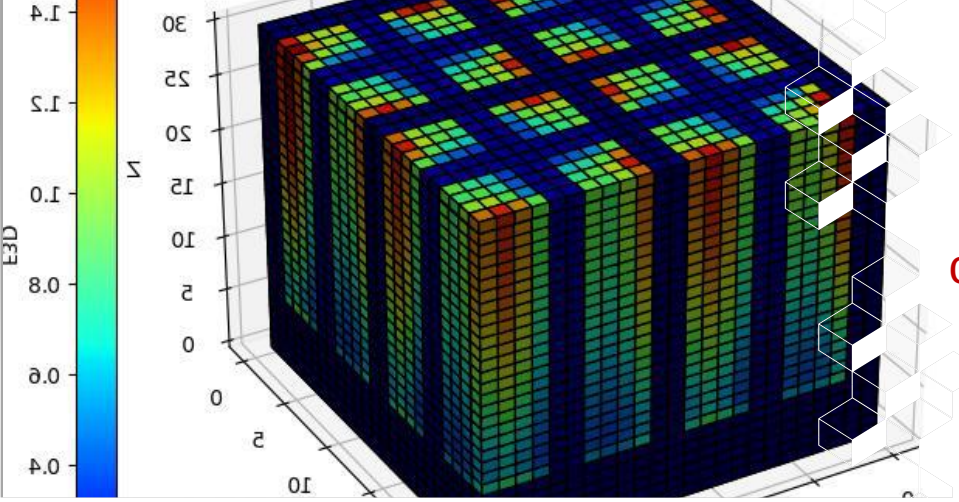
RNR-Pb, biais de modèle, Machine Learning

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

BUIRON Laurent
laurent.buiron@cea.fr



Modélisation thermohydraulique raffinée d'un assemblage chaud pour recherche de REC dans l'OCS de neutronique NARVAL3

DER/SPRC/LPN

Ce stage vise à développer une modélisation thermohydraulique fine d'un assemblage chaud, au sein de l'OCS de neutronique NARVAL3, afin de disposer d'une méthode d'évaluation de Rapport d'Echauffement Critique (REC)

L'Outil de Calcul Scientifique NARVAL3, développé au SPRC/LPN, permet la modélisation neutronique et thermohydraulique de cœurs compacts. La résolution de la neutronique est basée sur le code APOLLO3® et la thermohydraulique sur le code multi-1D THEDI ; ce dernier fourni la possibilité de prendre en compte les effets de la thermohydraulique du cœur sur sa neutronique.

Ces effets multiphysiques se traduisent par des échanges de champs entre les deux parties du l'OCS : la neutronique calcule et fournit la puissance développée par le cœur à la thermohydraulique, celle-ci en déduit la distribution de température modérateur et combustible ; ces températures servent ensuite à réévaluer les sections efficaces et il en découle une nouvelle puissance.

Pour des raisons de performances informatiques, la finesse de la modélisation thermohydraulique est plus grossière que celle de la neutronique ; cette échelle est suffisante pour prendre en compte les contre-réactions thermohydrauliques (distributions de températures combustibles / densités modérateurs non uniformes) mais est en défaut pour évaluer une des grandeur thermohydraulique d'intérêt qu'est le Rapport d'Echauffement Critique.

Objectif du stage :

Le stage a pour objectif de représenter suffisamment finement la thermohydraulique de l'assemblage développant le plus de puissance pour une configuration donnée, afin d'étudier l'évacuation de sa puissance et d'évaluer si le flux de chaleur du combustible vers le modérateur mène à une ébullition nucléée saturée.
Les missions qui vous seront confiées sont les suivantes :

- Prise en main du code de l'OCS NARVAL3
- Implémentation d'un modèle fin de la thermohydraulique assemblage, et évaluation du REC
- Développement d'une méthode de recherche de REC par augmentation progressive de la puissance cœur, automatisation sur l'ensemble des configurations rencontrées sur la vie du réacteur

Ces travaux pourraient permettre d'améliorer la méthodologie actuelle de l'évaluation des REC en proposant un filtrage plus efficace des nappes de puissances, obtenus par la neutronique, fournies à l'OCS de thermohydraulique poreux de référence, FLICA5.

Vous réaliserez ce stage au sein du Laboratoire de Projets Nucléaires, qui est en charge du développement de l'OCS neutronique NARVAL3.

- **Formation souhaitée :**

Ecole d'ingénieur ou Master 2

Intérêt pour la neutronique, thermohydraulique et la physique des réacteurs

- **Durée du stage :**

4 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Unix/Linux, Python, Git

- **Mots clés :**

Neutronique, physique des réacteurs, thermohydraulique

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

Martin FOISSY
Martin.FOISSY@cea.fr

Modélisation d'une source neutronique de démarrage (alpha,n) à structure granulaire

DER/SPRC/LPN

Ce stage vise à développer une modélisation granulaire de sources neutroniques de démarrage de type (alpha,n), par simulation Monte Carlo, afin d'améliorer la prédiction de leur émission neutronique.

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.

Certaines de ces sources neutroniques reposent sur des réactions nucléaires où une particule alpha, émise par un radionucléide α-émetteur (comme l'américium-241), interagit avec un noyau léger, généralement de faible numéro atomique, tel que le béryllium-9. Lors de cette interaction, le noyau cible absorbe la particule alpha, conduisant à l'émission d'un neutron selon la réaction typique :

$$\alpha + {}^{9}Be \rightarrow 12C + n$$

Dans certains cas, ces sources se présentent sous forme de milieux granulaires, constitués de particules solides (poudres ou grains) mélangées mécaniquement.
La modélisation précise de ces milieux granulaires est nécessaire pour prédire correctement le débit d'émission neutronique de la source et son spectre énergétique. Le **module SaG4n** est un outil développé par le Ciemat et basé sur le code **Geant4**. Il permet de simuler par méthode Monte Carlo la production de neutrons issus de réactions (α,xn) de sources neutroniques de démarrage, en prenant en compte la géométrie et la composition isotopique du système.

Objectif du stage :

Le stage a pour objectif de modéliser un **milieu hétérogène de type granulaire** dans le code Geant4, représentatif de la structure d'une source neutronique de démarrage de type (α,n), puis de simuler la production de neutrons à l'aide de l'outil **SaG4n**.

Les missions qui vous seront confiées sont les suivantes :

- Prise en main de Geant4 et du module SaG4n.
- Implémentation d'un modèle géométrique de source hétérogène (ex. : grains d'AmO_2 dans une matrice de béryllium).
- Simulation des réactions (α,n) et calcul du spectre d'émission neutronique avec les librairies de données nucléaires JENDL/AN-2005 et JEFF-4.
- Comparaisons entre modèles simplifiés (c'est-à-dire homogènes) et représentations hétérogènes détaillées.
- Analyse de l'impact de la microstructure sur les performances de la source.

En fonction de l'avancée des travaux, la thématique suivante pourra être étudiée :

- Étude des méthodes de génération de géométries granulaires

Vous réaliserez ce stage au sein du Laboratoire de Projets Nucléaires qui est en charge de la conception neutronique de sources de démarrage.

Ce stage pourra faire l'objet d'une publication scientifique.

- **Formation souhaitée :**

Ecole d'ingénieur ou Master 2

Intérêt pour la neutronique et la physique des réacteurs

- **Durée du stage :**

4 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Unix/Linux, C/C++, Python, code de transport Monte-Carlo

- **Mots clés :**

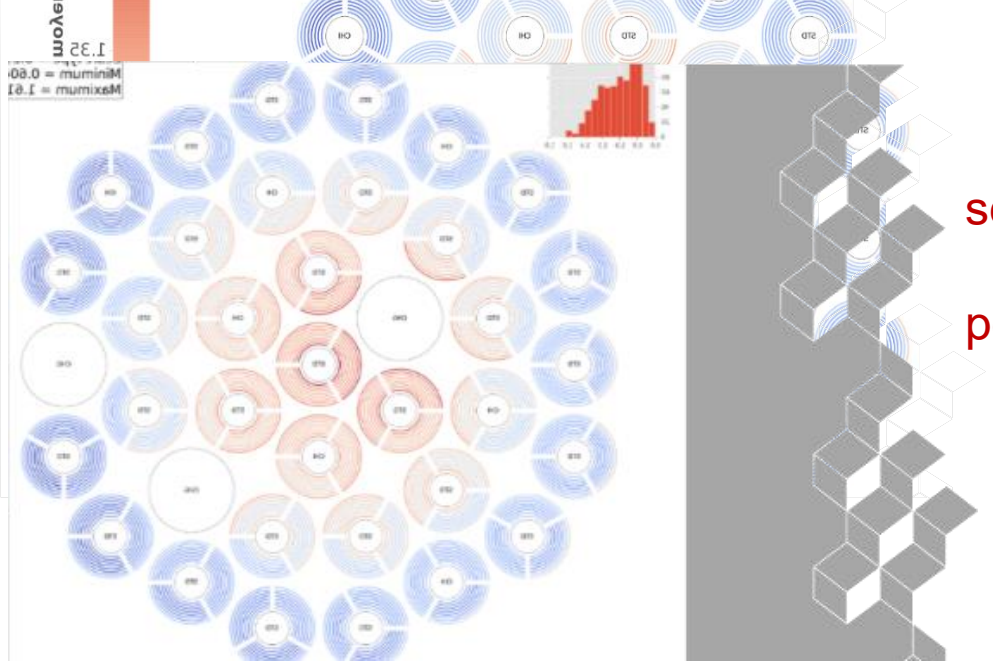
Neutronique, physique des réacteurs, sources neutroniques

- **Possibilité de thèse :**

Non

- **Contact :**

HUTINET Henri
henri.hutinet@cea.fr
BEN-YELLES Anis
anis.benyelles@cea.fr



Implémentation d'un schéma de calcul réseau en base Monte-Carlo pour des SMR sans bore soluble

DER/SPRC/LPN

Ce stage propose de tester un schéma de calcul hybride Monte-Carlo/diffusion destiné aux SMR à eau afin d'améliorer la prédiction, et les ressources de calcul nécessaires à leurs jumeaux numériques.

La conception d'un cœur de réacteur nucléaire nécessite l'évaluation de grandeurs neutroniques d'intérêt comme la distribution de la puissance ou la réactivité pour chaque configuration du cœur. La diversité des configurations cœurs possibles impose de disposer d'outils de calculs très rapides pour pouvoir toutes les étudier.

Il est alors courant de recourir à l'approximation de la diffusion pour simplifier la résolution. Cette dernière ne fournit des estimations fiables qu'à travers une remontée d'échelle rigoureuse qui nécessite la mise en place d'un premier calcul dit « réseau » ne modélisant qu'un seul assemblage combustible en réseau infini. Ce calcul en théorie du transport a pour objectif de fournir des données d'entrées moyennées prenant en compte les effets fin de la physique.

Ces calculs « réseau » sont généralement menés avec des outils déterministes tels qu'APOLLO2. L'étude d'assemblages particulièrement hétérogènes et la recherche d'une grande précision entrainent des temps de calculs importants. Parallèlement, d'autres outils de calcul ont été conçus pour mener des calculs de grande précision : les codes de Monte Carlo. L'enjeu de ce stage est d'explorer le compromis précision et temps de calcul proposé par ces derniers outils.

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 réacteurs expérimentaux. 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 demandé pour ce stage consiste à créer des jeux de données Monte-Carlo pour un assemblage unique, post-traiter leurs résultats pour générer des sections efficaces homogénéisées et condensées. Ces sections seront ensuite utilisées avec le calcul cœur complet du schéma industriel existant. Les résultats obtenus feront l'objet d'une comparaison à ceux du calcul de référence. L'étudiant prendra en main les codes de calcul TRIPOLI-4, SERPENT, ainsi que le formulaire de calcul industriel. Il implémentera le calcul des sections homogénéisées, et mènera des choix de modélisation avec l'aide de son encadrant. Des calculs de référence sur un cœur entier seront également menés sans remontage d'échelle pour juger des gains obtenus par rapport au schéma industriel.

- Formation souhaitée :

3ème année d'Ecole d'ingénieur ou Master 2 en Physique nucléaire

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Système d'exploitation Unix/Linux
Langage informatiques: Python

- Mots clés :

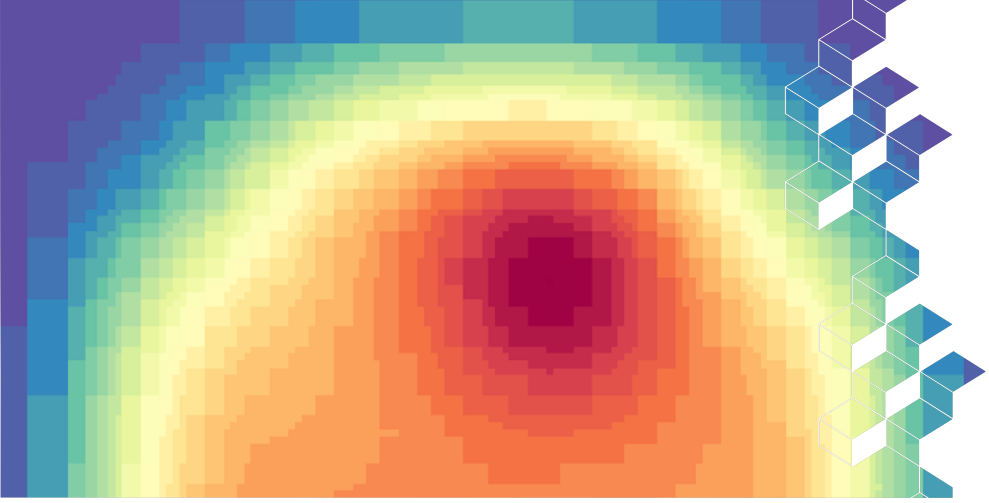
Neutronique, jumeau numérique, schéma de calcul, Monte Carlo,

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Victor du Buat
Victor.dubuat@cea.fr



Impact de la nouvelle évaluation JEFF-4.0 sur les modélisations SMR TRIPOLI-4, TRIPOLI-5, CRONOS2 et APOLLO3

DER/SPRC/LPN

La bibliothèque de données nucléaires JEFF-4.0 a récemment été publiée. Cette dernière a déjà pu montrer une forte réduction des incertitudes associées aux données nucléaires.

L'objectif de ce stage est d'évaluer l'impact de cette nouvelle bibliothèque sur les performances des formulaires de calcul neutronique développés au LPN. Le stagiaire évaluera de même les capacités du nouveau code stochastique de référence TRIPOLI-5 pour les réacteurs étudiés au LPN.

Dans les codes de simulation neutronique, les données nucléaires qui décrivent les interactions neutron-noyaux sont fournies sous forme de bibliothèques précompilées. Ces bibliothèques rassemblent la meilleure connaissance à date de ces interactions issue d'un complexe processus d'évaluation.

Le LPN développe plusieurs formulaires de calcul déterministe pour différents types de réacteurs à eau légère pressurisée qui utilisent tous une bibliothèque de données nucléaires standard et ancienne (JEFF-3.1.1 publiée en 2009). Or, une dernière évaluation majeure de cette bibliothèque de données vient d'être publiée (JEFF-4.0 publiée en 2025).

L'objectif de ce stage est donc d'identifier les apports de JEFF-4.0 dans le cadre du processus de validation des formulaires de calcul neutronique développés au LPN.

Le stagiaire sera amené :

- A prendre en main les différents formulaires de calcul déterministe (base CRONOS2 et APOLLO3) et à calculer les écarts engendrés par le changement des données nucléaires.
- A comparer ces écarts avec ceux calculés par les codes de calcul stochastiques TRIPOLI-4 et TRIPOLI-5.
- A expliquer ces écarts au regard des variations initiales des données nucléaires utilisées.

Un objectif secondaire du stage est aussi de reproduire les géométries des réacteurs étudiés au LPN avec le moteur géométrique natif de TRIPOLI-5, afin évaluer la non-régression de ce nouveau code de simulation.

- Formation souhaitée :

Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur. Connaissances en neutronique et physique des réacteurs souhaitées.

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Unix, Python, TRIPOLI-4, TRIPOLI-5, CRONOS2, APOLLO3, ROOT

- Mots clés :

neutronique, RJH, SMR

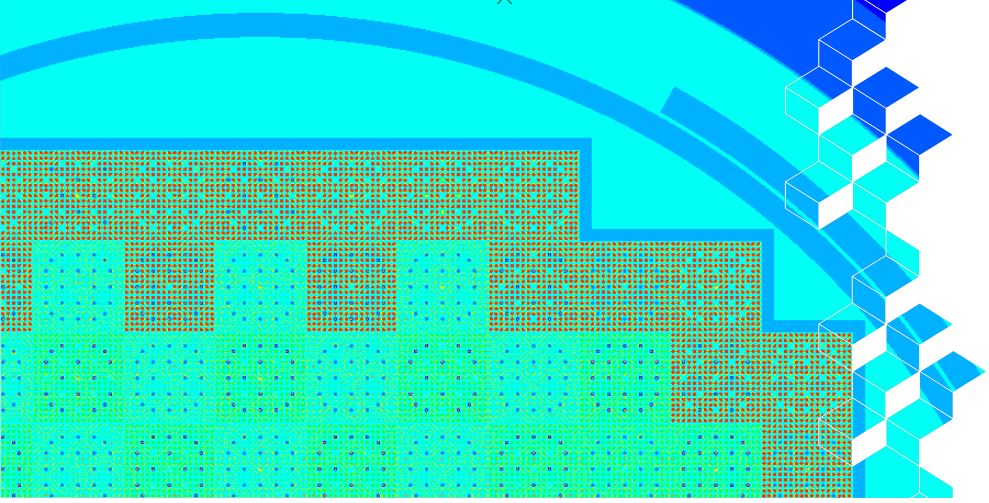
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

VANDERMEERSCH Elias

elias.vandermeersch@cea.fr



Développement d'un modèle de calcul cœur REP pour l'évolution de sources de démarrage

DER/SPRC/LPN

Ce stage vise à développer une modélisation 3D d'un cœur de type REP spécifique au calcul d'évolution 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 source – 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 ou la formation de gaz.

Ce schéma de calcul vise à être utilisé à terme pour la conception de sources neutroniques de démarrage et pour l'interprétation de programmes expérimentaux.

Objectif du stage :

Le stage a pour objectif le développement d'un schéma de calcul 3D d'un cœur REP basé sur les codes du CEA APOLLO2, CRONOS2 et DARWIN.
Les missions qui vous seront confiées sont les suivantes :

- Prise en main des outils de calcul scientifique de neutronique (APOLLO2, CRONOS2, DARWIN) ;
- Développement d'un jeu de données du code CRONOS2 modélisant des crayons sources de démarrage dans un cœur de REP (géométrie 3D) ;
- Elaboration d'un schéma de calcul destiné à l'évaluation des grandeurs d'intérêt associées à la source de démarrage ;
- Validation des résultats par comparaison avec ceux obtenus à l'aide de codes de référence.

En fonction de l'avancée des travaux une intégration du code Monte-Carlo TRIPOLI-4® au schéma de calcul pourra être mis en œuvre pour l'évaluation des échauffements photoniques.

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 neutronique et la physique des réacteurs

- Durée du stage :

4 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Unix/Linux, Python, code de transport Monte-Carlo

- Mots clés :

Neutronique, physique des réacteurs, sources neutroniques

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

BEN-YELLES Anis

anis.benyelles@cea.fr

Département de Technologie Nucléaire

©A.Aubert /CEA

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 Departement

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).

©A.Aubert /CEA

Sujets de stage
Internships Subjects

Département de technologie nucléaire / Nuclear Technology *Departement*

SMTA – Service mesures et modélisation des transferts et des accidents graves

Calibration des mesures de flux thermique dans l'installation MERELAVA
Calibration of thermal flux measurements in the MERELAVA facility
Méthode inverse de caractérisation de flux thermiques à très haute température
Développement d'une API python pour une application Java
Simulation numérique d'écoulements diphasiques avec transfert de masse : validation d'un modèle de champ de phase
Simulation numérique du transfert de chaleur par rayonnement et conduction : validation de modèles approchés
Modélisation et simulation d'écoulement de phase dispersée par une méthode des moments
Etudes par simulation Monte Carlo et validation expérimentale d'un système de détection radiologique par spectrométrie gamma pour le tri de terres contaminées
Optimisation du paramétrage d'un modèle hydrogéologique « pluie-niveau » semi-physique par inférences bayésiennes
Analyse hydrologique et caractérisation expérimentale des processus de ruissellement et d'infiltration pour le bilan hydrique du bassin versant du Ravin de la Bête
Hydrological analysis and experimental characterization of runoff and infiltration processes for the water balance of the Ravin de la Bête watershed

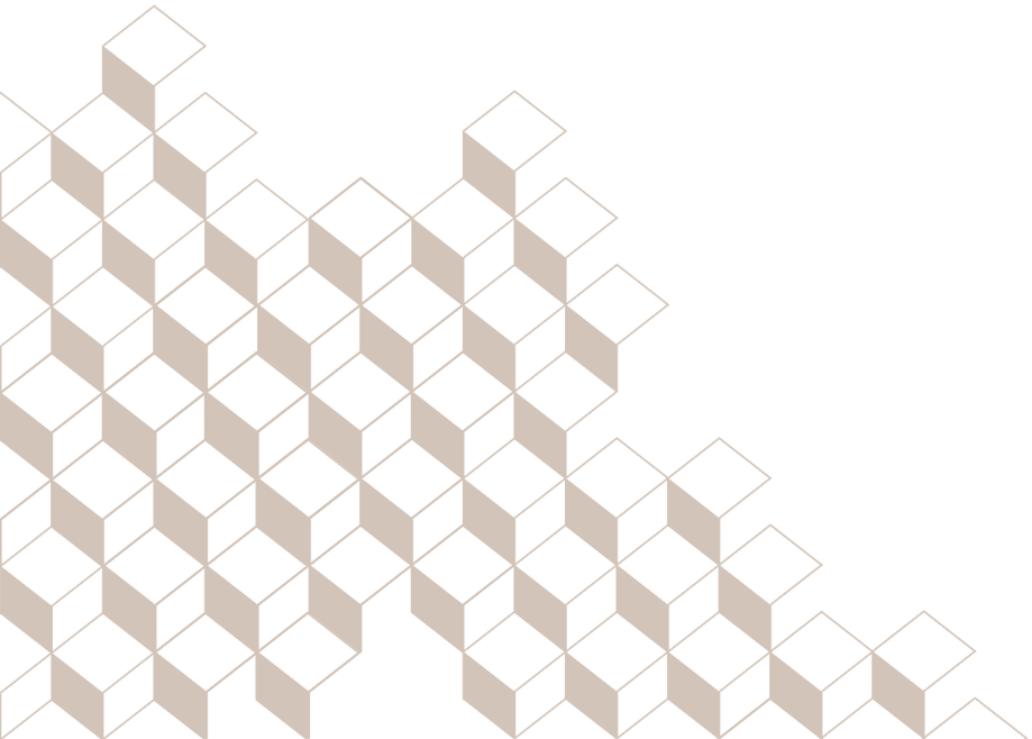
STCP – Service de technologie des composants et des procédés

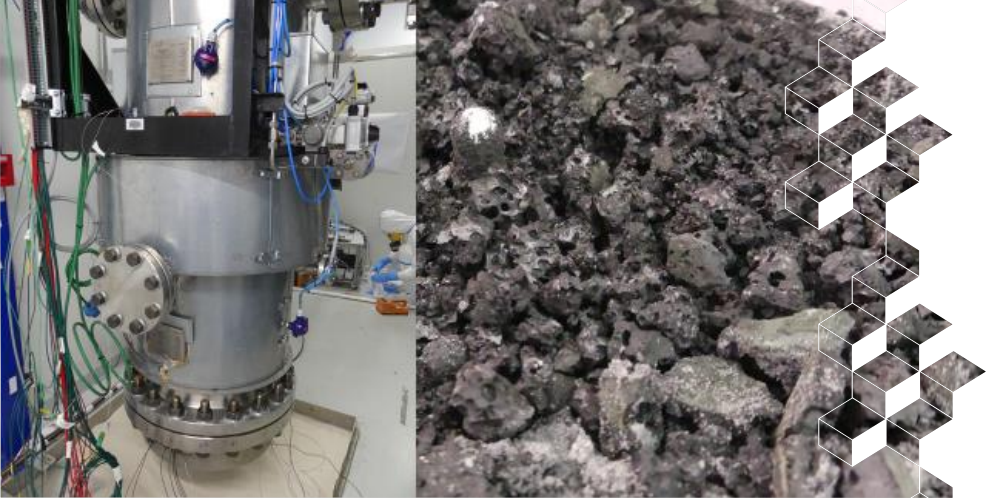
Etude CFD en convection naturelle au sein d'une boucle expérimentale
Etude thermique d'une Pompe Electromagnétique
Validation de modèles CFD pour l'étude de canaux d'échange tridimensionnels
Développement d'un système électronique embarqué pour l'instrumentation électromagnétique
Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un écoulement dans une pompe électromagnétique
Conception d'un dispositif expérimental pour l'étude physico-chimique des mécanismes de nucléation de bulles au sein d'écoulements cavitants
Design of an experimental device for the physico-chemical study of bubble nucleation mechanisms in cavitating flows
Application de la Réalité Etendue sur des installations expérimentales

S M T A

Service mesures et modélisation des transferts et des accidents graves

Transfer and Severe Accident Modelling Unit





Calibration des mesures de flux thermique dans l'installation MERELAVA

DTN/SMTA/LEAG

Ce stage a pour but de calibrer les mesures de flux thermique dans l'installation MERELAVA, dédiée à l'étude des accidents nucléaires graves. Cette expérience se focalise en particulier sur la phase hors cuve, lors de l'aspersion du corium par le haut.

Contexte et objectifs du stage

La sûreté des réacteurs nucléaires est essentielle pour le développement de cette énergie. La plateforme PLINIUS permet d'étudier des accidents nucléaires graves hypothétiques pour développer des stratégies de mitigation, sur plusieurs installations. Dans ces accidents, le corium, cœur en fusion à environ 2000°C, interagit avec le radier en béton, provoquant son ablation progressive. Une stratégie de refroidissement consiste à asperger le corium d'eau par le haut, étudiée expérimentalement sur l'installation MERELAVA.

MERELAVA est un banc expérimental cylindrique rempli de corium simulant ou prototypique pendant les essais, et pouvant être chauffé par induction pour simuler la puissance nucléaire résiduelle. Du béton sacrificiel peut être ajouté pour évaluer son ablation. Le corium à haute température est alors aspergé d'eau, entraînant des échanges multiphysiques complexes (ébullition, rayonnement, solidification, fracturation, dégagement gazeux). Les recherches actuelles visent à évaluer le flux de chaleur qu'il est possible d'extraire, mais la mesure expérimentale de ce flux est difficile et perturbée, nécessitant un calibrage précis des capteurs.

Déroulement du stage

Ce stage propose d'étudier l'ébullition dans un environnement modèle sans matériau fondu, afin de maîtriser les flux, calibrer les instruments et déterminer les incertitudes de mesure. Des pré-calculs thermiques seront également réalisés avec COMSOL. Une comparaison avec les résultats d'essais existants sera aussi réalisée.

Le travail consistera donc à :

- S'approprier le fonctionnement de l'installation ;
- Participer à la définition et à la réalisation d'essais en milieu modèle, en collaboration avec l'équipe du laboratoire ;
- Comparer les résultats avec des modèles analytiques ou numériques (COMSOL, différences finies), estimer les pertes thermiques ;
- Appliquer les résultats à l'interprétation des essais corium.

Cadre de réalisation du stage

Le stagiaire sera intégré au Laboratoire d'études et d'expérimentation pour les accidents graves (**LEAG**), sur le site de Cadarache. Ce travail pourra se poursuivre par une thèse sur l'étude du mécanisme d'imbibition.

- Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieurs généraliste (2ème ou 3ème année) ou Master 2 universitaire, avec spécialisation en mécanique des fluides et énergétique

- Durée du stage :

5 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Instrumentation, Python, COMSOL

- Mots clés :

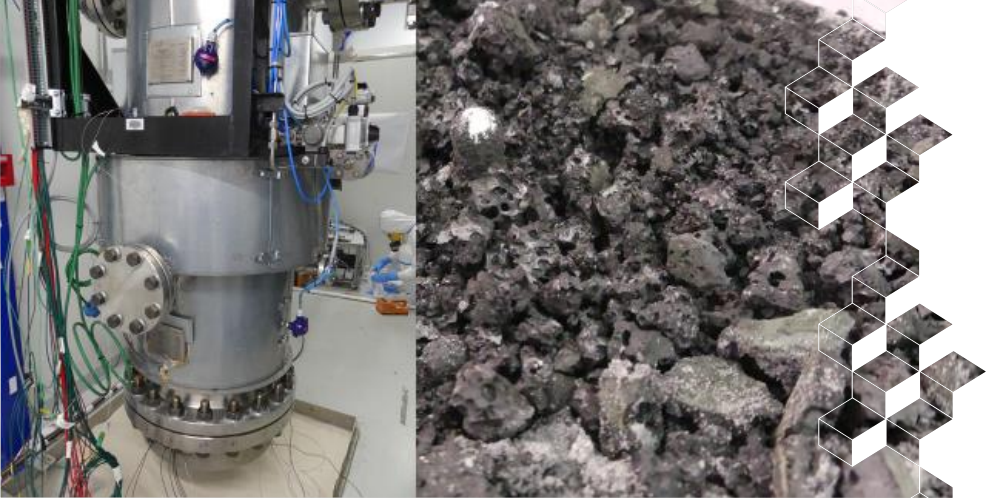
Métrologie, Modélisation, Transfert de masse et de chaleur, Incertitudes.

- Possibilité de thèse :

Oui.

- Contact :

Sébastien RENAUDIERE de VAUX
sebastien.renaudieredevaux@cea.fr



Calibration of thermal flux measurements in the MERELAVA facility

DTN/SMTA/LEAG

This internship aims to calibrate thermal flux measurements in the MERELAVA facility, which is dedicated to the study of severe nuclear accidents. The experiment focuses particularly on the ex-vessel phase, specifically during the top flooding of the corium.

Internship Context and Objectives

The safety of nuclear reactors is essential for the development of nuclear energy. The PLINIUS platform enables the study of hypothetical severe nuclear accidents in order to develop mitigation strategies across several facilities. In such accidents, the corium—a molten mixture at approximately 2000°C—interacts with the concrete basemat, causing its gradual ablation. One cooling strategy involves spraying water onto the corium from above, a process studied experimentally on the MERELAVA facility.

MERELAVA is a cylindrical experimental setup filled with either simulated or prototypical corium during tests, and can be heated by induction to simulate residual nuclear power. Sacrificial concrete can be added to assess its ablation. The high-temperature corium is then sprayed with water, leading to complex multiphysical exchanges (boiling, radiation, solidification, fracturing, gas release). Current research aims to evaluate the heat flux that can be extracted, but experimental measurement of this flux is challenging and prone to interference, requiring precise calibration of the sensors.

Internship Program

This internship proposes to study boiling in a model environment without molten material, in order to control the fluxes, calibrate the instruments, and determine measurement uncertainties. Preliminary heat transfer calculations will also be performed using COMSOL. A comparison with existing test results will be carried out.

The work will therefore involve:

- Familiarizing oneself with the operation of the facility;
- Participating in the definition and execution of model environment tests, in collaboration with the laboratory team;
- Comparing results with analytical or numerical models (COMSOL, finite differences), estimating thermal losses;
- Applying the results to the interpretation of corium tests.

Internship Framework

The intern will be integrated into the Laboratory for Studies and Experimentation on Severe Accidents (LEAG), located at the Cadarache site. This work could lead to a PhD thesis on the study of the imbibition mechanism.

- Formation souhaitée :

Final year of engineering school or Master's degree (M2), with a specialization in fluid mechanics, energy, heat and mass transfer

- Durée du stage :

5 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Experimental measurements, Python, COMSOL

- Mots clés :

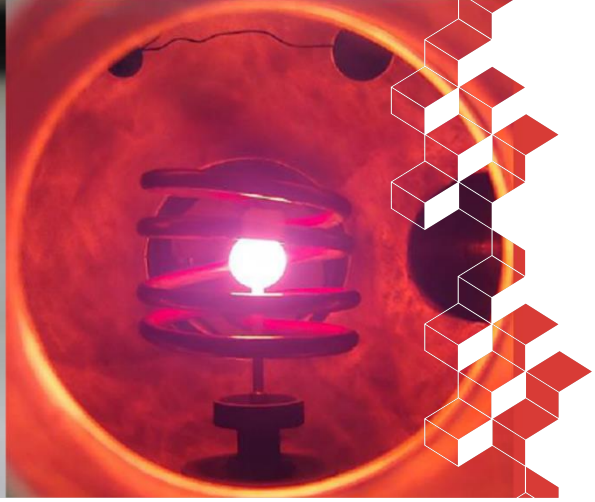
Instrumentation, Modeling, Heat and mass transfer, uncertainties.

- Possibilité de thèse :

Yes.

- Contact :

Sébastien RENAUDIERE de VAUX
sebastien.renaudieredevaux@cea.fr



Méthode inverse de caractérisation de flux thermiques à très haute température

DTN/SMTA/LEAG

Ce stage doit permettre de mettre en œuvre une méthode inverse afin de déduire le flux thermique échangé entre une sphère en tantale (chauffée à 2300 °C) et du sodium liquide à partir de mesures de température par thermocouples insérés dans la sphère.

Contexte et objectifs du stage

Le programme expérimental **SERUA** vise à mesurer le flux thermique échangé entre une sphère de **tantale**[1] chauffée à plus de 2300 °C et du **sodium liquide**[1] à 870 °C. Il se produit alors une ébullition en film du sodium autour de la sphère. Ce phénomène est important dans le cadre des travaux sur les accidents graves dans les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

L'objectif de ce stage est de mettre en œuvre une **méthode inverse**[2] afin de déterminer le **flux thermique** à partir des mesures de température réalisées par des thermocouples insérés à l'intérieur de la sphère en tantale.

Déroulement du stage

Dans un premier temps, il s'agira de s'approprier le contexte, qui comprend notamment :

- Des éléments de littérature sur l'ébullition en film du sodium ;
- Les techniques de méthodes inverses ;
- La configuration expérimentale de l'expérience SERUA.

Il s'agira ensuite d'utiliser les données produites par les bancs d'essais de qualification de l'instrumentation haute température afin d'adapter une technique de méthode inverse, puis de l'éprouver en conditions représentatives des essais finaux.

Suivant l'avancée du travail, les résultats pourront être capitalisés au sein d'outils de modélisation multi-physiques existants, afin de raffiner le protocole d'essais des expériences SERUA et d'aider in fine à la construction de la grille d'essais.

Un travail réussi dans le cadre de ce stage permettra l'acquisition de compétences approfondies et transverses, dans différents domaines relatifs à l'approche métrologique, les méthodes de caractérisation haute température et la simulation numérique multi-physique.

Cadre de réalisation du stage

Le stage se déroulera au sein du Laboratoire d'Expérimentation en Accidents Graves (**LEAG**) et du Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (**LMAG**). Ces deux laboratoires portent le besoin scientifique qui justifie les expériences SERUA.

[1] Le tantale est un métal réfractaire qui fond à plus de 3000 °C. Le sodium est un métal à bas point de fusion (97 °C), et qui bout à 883 °C à pression atmosphérique.

[2] Une méthode inverse cherche à remonter à la cause (le flux) à partir de ses effets (les températures mesurées)

- **Formation souhaitée :**

Ecole d'ingénieurs généraliste (2ème ou 3ème année) ou Master 2 universitaire, avec spécialisation en thermique

- **Durée du stage :**

4 à 6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Méthode inverse, Python, COMSOL

- **Mots clés :**

Métrologie, Modélisation, Transfert thermique.

- **Possibilité de thèse :**

Non.

- **Contact :**

DELACROIX Jules
jules.delacroix@cea.fr

Développement d'une API python pour une application Java

DTN/SMTA/LMAG

L'objectif de ce stage est de participer au développement d'une Interface de Programmation d'Application (API) en langage Python pour la plateforme PROCOR. Cette plateforme est développée par le CEA en langage Java pour les besoins d'études de sûreté des réacteurs nucléaires.

Contexte et objectifs du stage

La plateforme PROCOR (langage Java) propose un ensemble de classes qui permet de simuler l'évolution d'un réacteur nucléaire pendant un accident grave. Cela nécessite, entre autres, de coupler[1] de nombreux modèles physiques entre eux.

Une Interface de Programmation d'Application (API) en langage Python permettrait d'automatiser les nombreuses instructions requises par PROCOR pour réaliser un tel couplage, facilitant ainsi l'utilisation de la plateforme par des non-développeurs.

L'objectif de ce stage est d'aboutir à une première version de cette API, qui permettrait de coupler 2 modèles simples par un script Python.

Déroulement du stage

Après une phase de découverte durant laquelle l'étudiant se formera à l'utilisation de la plateforme, grâce à des tutoriels développeurs, une seconde phase aura pour but de recueillir les besoins des futurs utilisateurs de l'API.

Sur la base de ces besoins exprimés, des connaissances acquises par le stagiaire lors de la phase de découverte, et en discussion avec l'encadrement, il s'agira ensuite de concevoir et de réaliser une couche objet intermédiaire en Python pour faire le lien entre le script et les objets Java sous-jacents.

Enfin, la phase finale consistera à réaliser des tests de l'API en vue de sa démonstration aux futurs utilisateurs.

Cadre de réalisation du stage

Le stage se déroulera eu sein du Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves (LMAG), qui a en charge de développer la plateforme PROCOR.

L'étudiant sera assisté dans ses travaux par ses encadrants, qui appartiennent à l'équipe des développeurs de la plateforme.

[1] Deux modèles physiques sont **couplés** lorsque chacun d'eux a besoin des résultats de l'autre pour être résolu

- Formation souhaitée :

Ecole d'Ingénieur 2e année ou Master 1 Universitaire

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, Java, Linux, JPype

- Mots clés :

Accident Grave, Simulation, RNR-Na, REP, PROCOR, Python, Java

- Possibilité de thèse :

Non

- Contact :

Rémi Clavier, Romain Le Tellier
remi.clavier@cea.fr

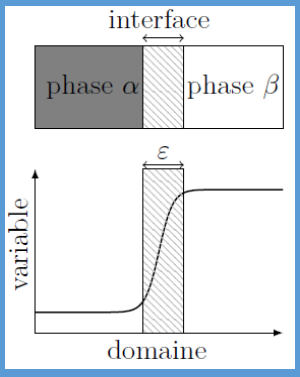


Schéma de principe de la représentation diffuse d'une interface dans une méthode de champ de phase

Simulation numérique d'écoulements diphasiques avec transfert de masse : validation d'un modèle de champ de phase

DTN/SMTA/LMAG

Un stage alliant modélisation et simulation numérique pour traiter du couplage à l'œuvre entre transfert de masse et hydrodynamique dans la description du comportement de deux liquides immiscibles.

Le tout en lien avec la sûreté des réacteurs nucléaires.

Contexte applicatif : Etude des accidents graves des réacteurs à eau légère dans le but d'améliorer les moyens de prévention et mitigation associés. Plus particulièrement, comportement du corium (métaux et oxydes sous forme liquide issus de la fusion des matériaux du cœur du réacteur) au fond de la cuve du réacteur dans une stratégie de mitigation où l'on cherche à garder la cuve intègre par le biais d'un refroidissement externe (« In-Vessel Retention »).

Equipe d'accueil : Le laboratoire LMAG du CEA travaille sur la modélisation et la simulation numérique des accidents graves et, en particulier, du comportement du corium. Plus spécifiquement, l'équipe d'accueil de ce stage s'intéresse à des simulations à une échelle « mésoscopique » qui est celle des simulations en « Computational Fluid Dynamics » (CFD) réalisées avec le logiciel open-source TRUST/TrioCFD, dont la finalité est la simulation d'une partie de la séquence de propagation du corium lors de l'accident grave. Dans ce cadre, un module de ce code est développé en se basant sur la méthode à interface diffuse dite « de champ de phase » qui permet de modéliser des phénomènes physiques complexes (comme la démixtion) tout en offrant un suivi implicite des interfaces (dans un cadre purement Eulérien).

Objectif du stage : Réaliser et analyser des simulations numériques en support à la validation et l'amélioration de ce module de champ de phase dans son application à des cas de couplage entre transfert de masse interphase et hydrodynamique diphasique. Ce travail passera par une appropriation :

- des modèles et de leurs fermetures/paramètres mis en jeu ;
- du logiciel de simulation numérique mis en œuvre (avec ses outils de pré- et post-traitements).

L'étudiant sera force de proposition sur la définition de ces cas test en s'appuyant sur une analyse de la littérature ouverte.
Un cas en particulier sera analysé : celui d'une goutte d'un matériau A plongée dans un matériau B où, initialement, le matériau A est plus léger que le matériau B mais où, sous l'effet d'un transfert de masse entre les deux, une inversion de densité intervient au cours du transitoire et modifie la trajectoire de la goutte. En effet, ce cas s'apparente au devenir d'une goutte d'acier plongée dans un corium oxyde avec transfert d'uranium et zirconium dans la goutte.
Suivant le profil du candidat, ce stage pourra être complété avec une partie de développement logiciel (relative à la résolution numérique des équations mises en œuvre) afin d'améliorer ses performances.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre : Compréhension et analyse de phénomènes physiques complexes et couplés, simulation numérique, mise en œuvre de méthodes numériques de CFD multiphasique.

- Formation souhaitée :

M2 mécanique des fluides ou physique numérique par exemple

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRUST/TrioCFD (C++), Outils de post-traitement (visit/paraview, python)

- Mots clés :

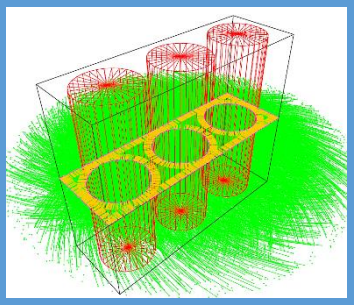
Mécanique des fluides, simulation numérique, réacteurs nucléaires, accidents graves

- Possibilité de thèse :

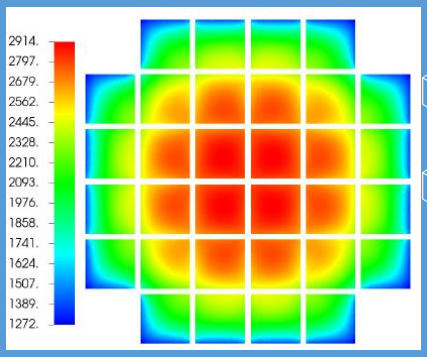
Potentiellement

- Contact :

LE TELLIER Romain,
EON Luis
romain.le-tellier@cea.fr,
luis.eon@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)

Simulation numérique du transfert de chaleur par rayonnement et conduction : validation de modèles approchés

DTN/SMTA/LMAG

Un stage alliant modélisation et simulation numérique pour l'évaluation de deux modes de transfert de chaleur couplés : rayonnement et conduction.

Le tout en lien avec la sûreté des réacteurs nucléaires.

Contexte applicatif : Etude des accidents graves des réacteurs à eau légère dans le but d'améliorer les moyens de prévention et mitigation de leurs conséquences. Plus particulièrement, étude des transferts thermiques pendant la phase de dégradation de cœur de petite taille où le rayonnement joue un rôle crucial vis-à-vis du déroulement de l'accident.

Equipe d'accueil : Le laboratoire LMAG 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 de la dégradation. 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.

Objectif du stage : Construire et mettre en œuvre une suite de cas de validation (de complexité croissante) pour la comparaison de différents modèles approchés à des simulations de référence. Des modèles de rayonnement thermique, évalués dans un premier temps par simulation avec un code Monte-Carlo dans une géométrie détaillée, sont adaptés et utilisés avec le code de calcul CFD open-source TRUST/TrioCFD développé par le CEA. Ces méthodes, précises mais coûteuses en temps de calcul informatique, permettront de fiabiliser des modèles approchés rapides, qui seront testés et validés dans une maquette logicielle représentative des outils de calcul utilisés pour les études de sûreté des réacteurs nucléaires.

Le travail passera par une appropriation :
- des modèles approchés et des hypothèses associées ;
- des logiciels de simulation numérique mis en œuvre (avec leurs outils de pré- et post-traitements).

La définition des cas de validation s'appuiera sur des configurations géométriques de cœurs de réacteurs tirées de la littérature scientifique. Un point-clé de ce travail portera sur la construction logique des cas tests vis-à-vis des modèles approchés considérés. Cette démarche de validation « par parties » doit permettre de dégager et prioriser les pistes d'amélioration de ces modèles. Ces pistes pourront être abordées dans le stage si le temps et le profil du candidat (au sens où du développement logiciel sera alors nécessaire) le permettent.

Ce stage participera *in fine* à la validation et l'amélioration des modèles de rayonnement mis en jeu dans les codes accidentels.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre : Compréhension et analyse de modèles algébriques, simulation numérique dans un environnement d'informatique scientifique.

- Formation souhaitée :

M2/ingénieur en physique, simulation numérique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Python, divers codes de simulations (TRUST/TrioCFD en particulier)

- Mots clés :

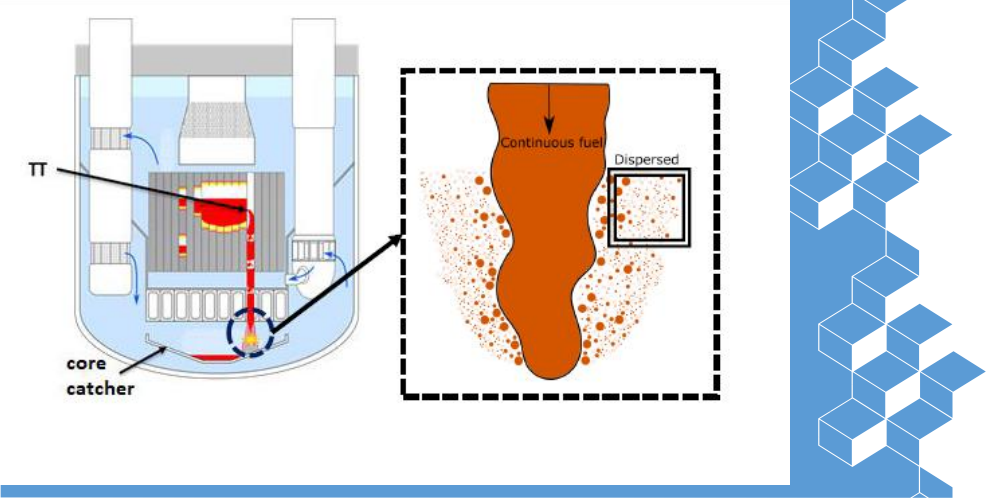
Transfert thermique radiatif, conduction thermique, simulation numérique, réacteurs nucléaires, accidents, sûreté

- Possibilité de thèse :

Potentiellement

- Contact :

LE TELLIER Romain,
MANCHON Xavier
romain.le-tellier@cea.fr,
xavier.manchon@cea.fr



Modélisation et simulation d'écoulement de phase dispersée par une méthode des moments

DTN/SMTA/LMAG

Un stage alliant modélisation, programmation et simulation numérique pour traiter des écoulements en phase dispersée.

Le tout en lien avec la sûreté des réacteurs nucléaires.

Contexte applicatif : Ce stage s'inscrit dans le cadre des études de sûreté associées aux Accidents Graves dans les Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au Sodium et plus particulièrement lorsqu'un cœur fondu se relocalise par gravité vers le récupérateur en fond de cuve. Un jet de corium (mélange de combustible et éléments structurels du cœur fondus) interagit alors violemment avec le fluide caloporteur du réacteur. Ce phénomène est appelé FCI pour Fuel Coolant Interaction. L'interaction induit entre autres la fragmentation du jet de corium en gouttes couplée à l'ébullition en film du réfrigérant. Les caractéristiques de la phase dispersée de corium et de sa fragmentation sont déterminantes pour étudier l'emballement des transferts de masse menant potentiellement à une explosion vapeur.

Equipe d'accueil : Le laboratoire LMAG 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 la modélisation et simulation d'interaction entre du corium et un réfrigérant.

Objectif du stage : Analyser des modèles et méthodes de résolution méso-scopique pour simuler des écoulements en phase dispersée. Les méthodes des moments, qui découlent des approches cinétiques basées sur l'équation de Boltzmann, pourraient offrir un bon potentiel entre précision et temps de calcul pour simuler des écoulements en phase dispersée hors équilibre thermique et dynamique. Etudier cette stratégie dans un cadre simplifié monodimensionnel permettra d'évaluer cette voie de modélisation et mettre en lumière des difficultés et verrous scientifiques. Ce travail passera par :

- une appropriation de la littérature sur des modèles et leurs fermetures ainsi que des méthodes de résolutions associées
- L'implémentation dans un code 1D des approches retenues dans un cadre simplifié mais pertinent pour le contexte de travail
- Une démarche de validation et qualification des résultats numériques

Dans ce stage à vocation de recherche, les problématiques multi-échelles suivant des modèles complexes seront abordées. L'étudiant pourra être force de proposition notamment dans la stratégie de résolution, validation et de comparaison numérique des modèles. Suivant l'avancement du stage la proposition de terme d'interaction ou de couplage multiphasique sera envisageable.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre : Rigueur scientifique, compréhension et analyse de modèles mathématiques complexes et phénomènes physiques multiphasiques, méthodes numériques, programmation pour calcul scientifique, simulation numérique.

- Formation souhaitée :

Master/ingénieur en mathématiques appliquées, mécanique des fluides ou physique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Code 1D de recherche pour le stage (C++/Python). Code multi-D CFD C++ en thèse

- Mots clés :

Phase dispersée, Mécanique des fluides, simulation numérique, accidents graves

- Possibilité de thèse :

Oui

- Contact :

Kévin PONS (CEA) kevin.pons@cea.fr

Co-encadrement : Frédérique LAURENT-NEGRE et Aymeric VIE (CNRS-CentraleSupelec)

Etudes par simulation Monte Carlo et validation expérimentale d'un système de détection radiologique par spectrométrie gamma pour le tri de terres contaminées

DTN/SMTA/LMN

Dans le cadre de la gestion des terres excavées lors d'opérations d'assainissement, il est essentiel de disposer de systèmes performants permettant un tri efficace des sols tout en réalisant des mesures radiologiques en ligne. Un système intégré de tri-criblage et de mesures radiologiques gamma permet d'évaluer directement la contamination des terres et d'orienter leur gestion future (réutilisation, stockage, traitement).

Le système envisagé par le Laboratoire de Mesures Nucléaires (LMN) se base sur l'utilisation de détecteurs à scintillation NaI(Tl) pour effectuer l'identification et quantification des radionucléides d'intérêt par spectrométrie gamma.

Un premier stage effectué au LMN en 2025 a permis de modéliser ce dispositif à l'aide du code de transport de particules Monte-Carlo PHITS et d'optimiser la configuration des détecteurs NaI(Tl). Ces simulations ont montré qu'une configuration avec une dizaine de détecteurs de faible volume (10,2 × 10,2 × 5,1 cm^3) permettrait d'atteindre des limites de détection inférieures à 0,1 Bq/g, même dans des conditions pénalisantes (temps de mesure courts, bruit de fond naturel et artificiel pénalisants). L'étude a également mis en évidence l'influence de l'hétérogénéité de répartition de la contamination, ainsi que l'intérêt d'un blindage optimisé au plus près des détecteurs contre des sources parasites de rayonnements à proximité du dispositif. Ces résultats fournissent une base solide avant de commencer la mise au point expérimentale du prototype.

L'objectif de ce nouveau stage est de poursuivre le développement du système en explorant de nouveaux scénarios de contamination, en élargissant le spectre des radionucléides étudiés et en réalisant des validations expérimentales avec des sources de laboratoire placées dans du sable simulant une terre contaminée.

Les travaux proposés viseront plus spécifiquement à :

- étudier par simulation les limites de détection pour d'autres radionucléides, notamment les isotopes de l'uranium (^{235}U, ^{238}U) et du plutonium (^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu),
- évaluer la réponse du système au passage de "points chauds" (sources ponctuelles),
- simuler d'autres types de distributions hétérogènes de la contamination, comme par exemple des couches minces de 1 cm de terre contaminée (stratification de la contamination),
- valider expérimentalement le modèle numérique PHITS du système de mesure,
- estimer les incertitudes associées à chacun des effets étudiés par simulation,
- explorer des algorithmes innovants de correction du bruit de fond naturel.

- Formation souhaitée :

Master 2, PFE écoles ingénieurs

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Spectrométrie gamma, PHITS, Python

- Mots clés :

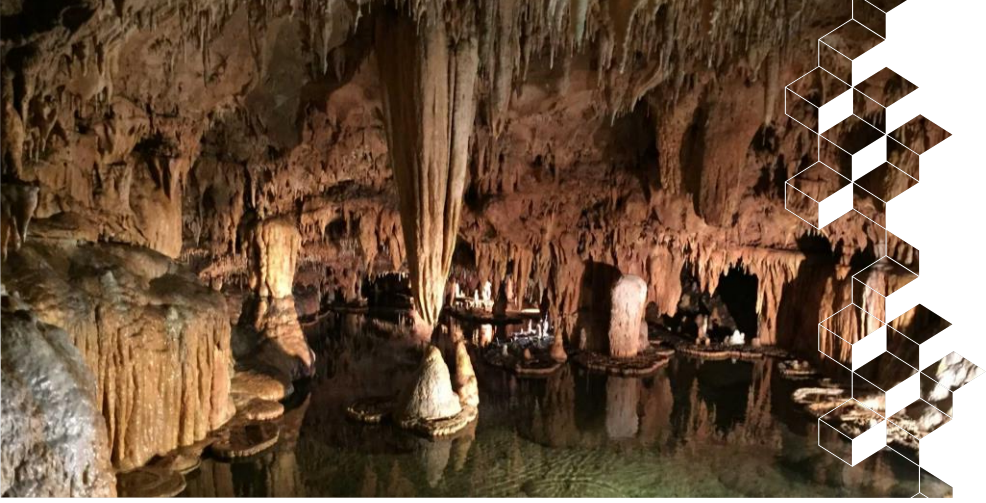
Terres contaminées, spectrométrie gamma, simulation Monte Carlo,

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

Francisco Salvador Barba
Bertrand Pérot
francisco.salvadorbarba@cea.fr
bertrand.perot@cea.fr



Optimisation du paramétrage d'un modèle hydrogéologique « pluie-niveau » semi-physique par inférences bayésiennes

DTN/SMTA/LMTE

Stage de Master 2 – Hydrogéologie & statistiques – 6 mois

Proposé par le CEA IRESNE et HydroSciences Montpellier (HSM) – Montpellier (34)

Le site du CEA de Cadarache est sujet aux inondations par remontée de nappe karstique. Tous les 10 ans, les Installations Nucléaires de Base (INB) implantées sur le site font l'objet d'un réexamen de sûreté au cours duquel est notamment réévalué le risque d'inondation par remontée de nappe phréatique. C'est dans ce cadre qu'a été mise au point la méthode MECK (Méthode d'Evaluation des Crues Karstiques), qui permet de calculer, par approche statistique, les niveaux de référence à prendre en considération dans le dimensionnement de chaque installation. MECK met en œuvre un modèle « pluie-niveau » semi-physique de type réservoir, qui s'appuie sur des données météorologiques afin de reconstituer les niveaux piézométriques passés. Le calage manuel des paramètres permet d'obtenir des niveaux piézométriques simulés proches des niveaux mesurés. Cependant, les paramètres retenus varient potentiellement selon l'opérateur, et il est difficile, en l'état, de savoir s'ils sont optimaux.

Dans ce contexte, l'objectif de ce stage est d'optimiser le calage des paramètres de ce modèle « pluie-niveau » et quantifier les incertitudes paramétriques associées. Pour une meilleure estimation des incertitudes, une approche Bayésienne sera développée pour estimer une distribution de paramètres et donc une enveloppe de simulations permettant une analyse statistique de l'ensemble des possibles. Cette approche doit aboutir à une calibration robuste du modèle MECK ainsi qu'une estimation des incertitudes prédictives (nécessaires à la prise de décision pour le dimensionnement des ouvrages du site).

A noter que ce stage s'inscrit dans le cadre d'une thèse co-encadrée par le CEA, HSM et l'IMT-Mines Alès, qui a débuté en novembre 2024.

Ce sujet de stage permettra d'aborder les questions scientifiques suivantes :

- Quelle est la sensibilité du modèle MECK à la variabilité spatiale des données de forçage (pluie et évapotranspiration en particulier) et aux données de calibration (niveaux piézométriques) ?

- Comment construire un outil de prédiction robuste en maîtrisant les incertitudes associées aux différents maillons de la chaîne de modélisation hydrogéologique ?

-Comment contraindre l'incertitude paramétrique d'un modèle semi-physique dans un milieu hétérogène ?

Le stage s'articulera autour des missions suivantes :

- Appropriation du contexte hydrogéologique local,
- Prise en main du modèle MECK,
- Analyse de sensibilité des paramètres du modèle MECK,
- Etude de l'équifinalité paramétrique et identification des potentielles réductions de dimension du modèle MECK,
- Mise en place d'un outil d'estimation des distributions de paramètre par inférences bayésiennes.

Ce stage sera co-encadré par le CEA de Cadarache et par le laboratoire HydroSciences-Montpellier, et se déroulera à Montpellier.

Le stage se déroulera dans les locaux de HSM. Des déplacements ponctuels auront lieu sur le site CEA de Cadarache ainsi qu'à IMT Mines Alès.

Le travail impliquera également un reporting des actions réalisées sous forme de compte-rendu et des présentations visant à exposer les résultats obtenus auprès de l'ensemble de l'équipe tout au long du stage. Ces supports serviront également à la rédaction du mémoire de fin de stage.

- **Compétences techniques recherchées :**
  - Programmation (Python)
  - Statistiques
  - Des notions en hydrogéologie seraient appréciées
  - Prise d'initiatives
  - Rigueur scientifique
  - Qualité rédactionnelle
  - Communication
- Formation souhaitée :

  Master 2 / 3ème année d'école d'ingénieur en hydro(géo)-logie ou maths appliquées, présentant une appétence pour la modélisation, l'hydrogéologie l'analyse de données et l'algorithmique

- Durée du stage :

  6 mois (février-août 2026, ajustable)

- Méthode/logiciel(s):

  Python, bureautique

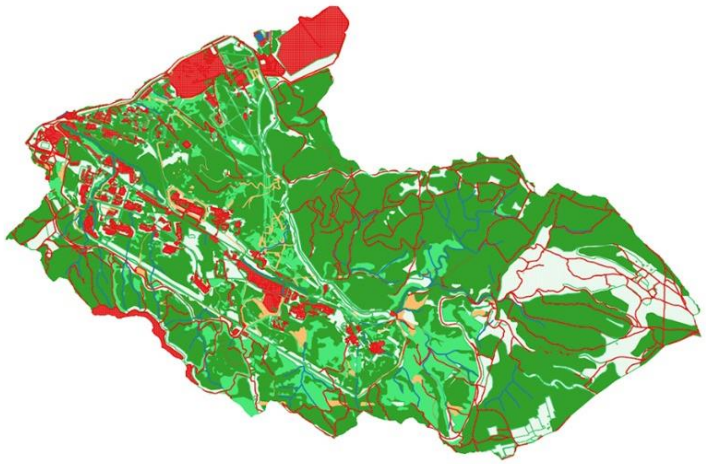
- Mots clés :

  Statistiques, inférences bayésiennes, hydrogéologie

- Possibilité de thèse :

- Contact :

vianney.sivelle@umontpellier.fr
sayane.jouanneau-couvret@cea.fr
sebastien.morilhat@cea.fr



Analyse hydrologique et caractérisation expérimentale des processus de ruissellement et d'infiltration pour le bilan hydrique du bassin versant du Ravin de la Bête

DTN/SMTA/LMTE

Le Laboratoire LMTE (CEA IRESNE sur le site de Cadarache) propose un stage de Master 2 en hydrologie appliquée. Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une recherche visant à améliorer la compréhension des processus hydrologiques dans le bassin versant du Ravin de la Bête, un cours d'eau temporaire représentatif des milieux méditerranéens soumis à des épisodes pluvieux intenses et à un risque d'inondation.

Le stage vise à caractériser expérimentalement les processus d'infiltration et de ruissellement et de renforcer les données hydrométriques nécessaires à la modélisation intégrée (ParFlow/CLM). L'étudiant·e sera impliqué·e dans :

- des mesures hydrodynamiques et pédologiques des sols,
- des campagnes de jaugeage, de construction et validation d'une courbe de tarage, des expérimentations de pluie simulée pour analyser les conditions de ruissellement,
- une synthèse bibliographique sur l'apport du LIDAR pour caractériser les sous-bassins (microrelief, rugosité, indices topographiques)
- ainsi que l'analyse de chroniques de débit, le traitement de données existantes et la valorisation scientifique des résultats.

Les données produites contribueront directement à une thèse en cours sur la spatialisation du bilan hydrique et la modélisation hydrologique intégrée..

- Formation souhaitée :

Master 2 en hydrologie, sciences de l'eau, géosciences ou environnement

- Durée du stage :

5–6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Infiltromètre à disque, infiltromètre à charge constante (Porchet), Courantomètre, Python/R, Excel, QGIS

- Mots clés :

Ruissellement, Infiltration, Expérimentions, Bilan hydrique, Bassin versant

- Possibilité de thèse :

Non

- Contacts :

SINABARIGUI Idrissou
idrissou.sinabarigui@cea.fr

COURTOIS Nathalie
nathalie.courtois@cea.fr

Hydrological analysis and experimental characterization of runoff and infiltration processes for the water balance of the Ravin de la Bête watershed

DTN/SMTA/LMTE

The LMTE Laboratory is offering a Master's 2 internship in applied hydrology. This internship is part of a research project aimed at improving understanding of hydrological processes in the Ravin de la Bête watershed, a temporary watercourse representative of Mediterranean environments subject to intense rainfall and flood risk.

The internship aims to experimentally characterize infiltration and runoff processes and to strengthen the hydrometric data necessary for integrated modeling (ParFlow/CLM). The student will be involved in:

- hydrodynamic and pedological measurements of soils,
- gauging campaigns, construction and validation of a calibration curve, simulated rainfall experiments to analyze runoff conditions,
- a bibliographic review on the contribution of LIDAR to characterize sub-basins (microrelief, roughness, topographic indices)
- as well as the analysis of flow records, the processing of existing data, and the scientific evaluation of the results.

The data produced will contribute directly to an ongoing thesis on the spatialization of water balance and integrated hydrological modeling.

- Formation souhaitée :

Master's degree in hydrology, water sciences, geosciences, or environmental studies

- Durée du stage :

5–6 months

- Méthode/logiciel(s):

Disc infiltrometer, Constant Level Infiltrometer (Porchet), Flow meter, Python/R, Excel, QGIS

- Mots clés :

Runoff, Infiltration, Experiments, Water balance, Watershed

- Possibilité de thèse :

No

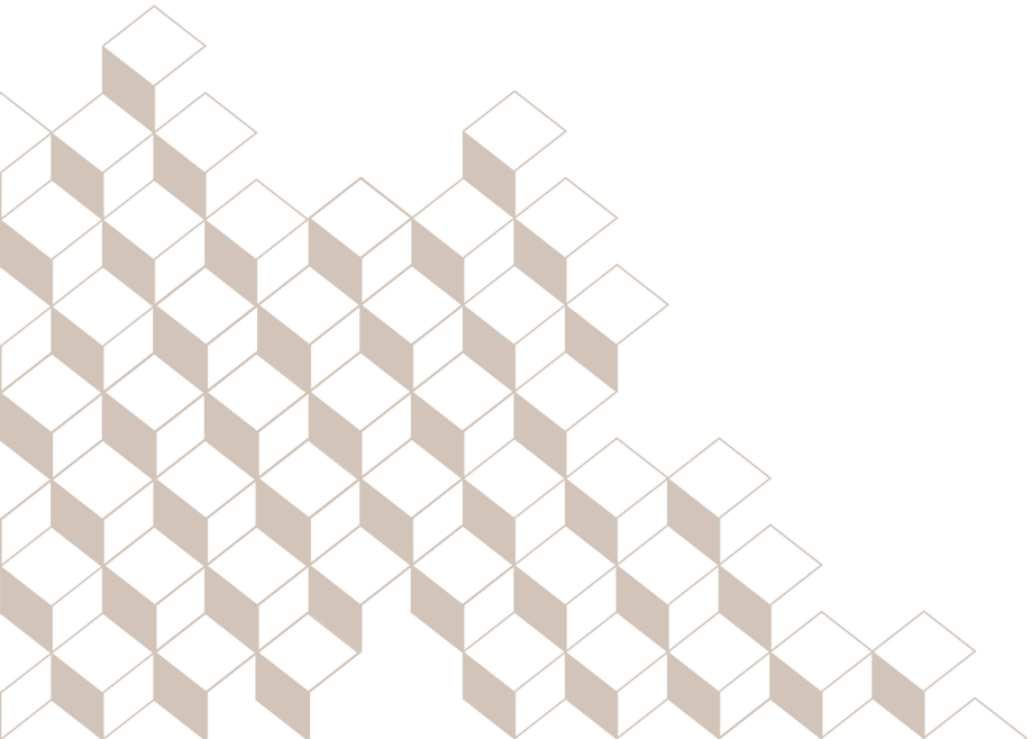
- Contact :

SINABARIGUI Idrissou
idrissou.sinabarigui@cea.fr
COURTOIS Nathalie
nathalie.courtois@cea.fr

STCP

Service de technologie des composants et des procédés

Component Technology and Processes unit



Etude CFD en convection naturelle au sein d'une boucle expérimentale

DTN/STCP/LCIT

L'objectif de ce stage sera de modéliser numériquement un écoulement de convection naturelle au sein d'une boucle expérimentale conçue par le laboratoire de Conception et d'Innovation Technologique (LCIT).

Le travail proposé se place dans le cadre des réacteurs nucléaires dits à sels fondus (ou Molten Salt Reactor, MSR). Le DTN/STCP est chargé de concevoir et exploiter des Boucles Analytiques pour l'étude de la Corrosion, Chimie et instrUmentation des sels Chlorures (BACCHUS). L'objectif est d'évaluer la capacité à maitriser la corrosion en sels fondus chlorures pour des températures comprises entre 570°C et 650°C avec circulation. Ces boucles seront exploitées courant 2025-2026.

Dans ces boucles de forme parallélépipédique, la circulation de sel est obtenue par convection naturelle, sans pompe, sur le principe du thermosiphon. Les masses de fluide les moins denses sont sollicitées vers le haut pendant que les plus denses descendent. Cette différence de densité du sel au sein de la boucle est obtenue par un réchauffeur et un refroidisseur positionné à des points opposés du circuit.

Des études CFD préalables, menées au sein du LCIT, ont mis en évidence la complexité des ces écoulements, avec notamment l'apparition d'un régime oscillant.

L'objectif de ce stage sera d'améliorer la compréhension d'un tel écoulement, en interrogeant le modèle CFD développé par le LCIT. Le stage devrait s'appuyer sur des mesures expérimentales.

Les calculs CFD seront réalisés prioritairement avec l'outil CEA TRIO-CFD. Des calculs avec ANSYS FLUENT seront envisageables.

- 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 :

4-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

TRIO-CFD, FLUENT, PYTHON, CATIA V5, Solidworks

- Mots clés :

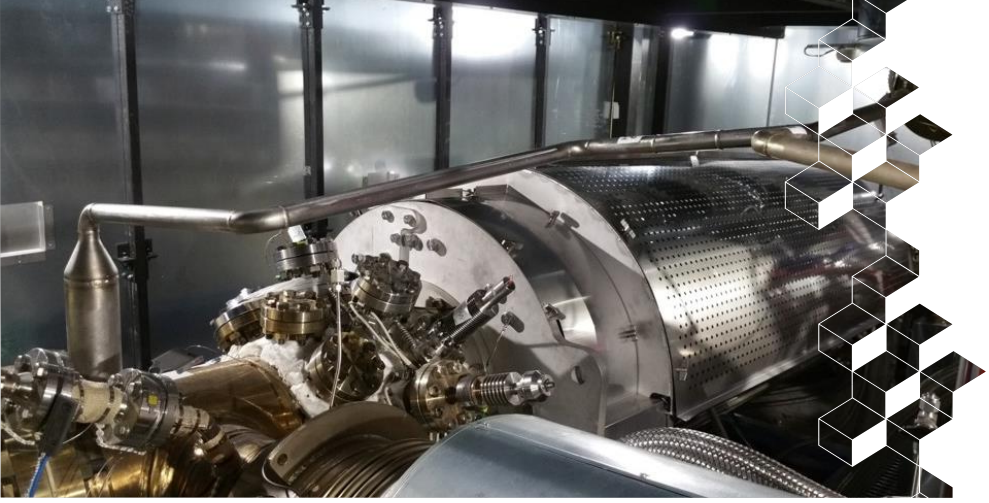
CFD, Simulation numérique, Convection naturelle

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

JEANNINGROS Xavier
xavier.jeanningros@cea.fr



Etude thermique d'une Pompe Electromagnétique

DTN/STCP/LCIT

Les Pompes ElectroMagnétiques (PEM) mettent en circulation des métaux liquides sous l'action de la force de Lorentz. Leur fonctionnement génère un chauffage du métal liquide par induction. Les températures engendrées peuvent être élevées (400°C et au-delà). Le stagiaire mènera une étude thermique se basant sur les études antérieures du laboratoire.

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 pompes électromagnétiques (PEM) sont très utilisées pour les circuits de métal liquide. Elles utilisent la force électromagnétique issue de l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique générés dans le métal liquide. De tels circuits sont présents notamment dans les réacteurs nucléaires refroidis au sodium. Cette technologie de réacteur est envisagée pour les Small Modular Reactors (SMR) et fait l'objet d'un soutien considérable de l'état dans le cadre du programme France 2030 (trois start-ups de conception de réacteur sodium sont lauréates de l'appel à projet).

La thermique dans une PEM est une contrainte très dimensionnante. En particulier pour les pompes à induction annulaires linéaires lorsque celles-ci sont envisagées au circuit primaire du réacteur.

Le LCIT a développé un modèle analytique de la thermique dans ce type de PEM. Un modèle numérique éléments finis sous COMSOL a ensuite été développé pour prendre en compte les effets 3D. Ce dernier nécessite encore d'être amélioré par la prise en compte de l'effet Joule lié à l'induction.

L'objectif du stage est donc de rajouter le chauffage par induction dans le modèle COMSOL existant. Ensuite, en fonction des zones critiques, le stagiaire proposera des solutions technologiques différentes de l'existant pour refroidir ces zones. Enfin une étude thermomécanique sera menée pour évaluer les dilatations thermiques et les contraintes associées de façon à valider le dimensionnement en fonction des exigences du référentiel retenu (RCC-MRx, CODAP), avec la prise en compte, le cas échéant, du fluage. De nouvelles solutions technologiques pourront être proposées pour accommoder ces dilatations et/ou relâcher des contraintes.

L'étudiant s'appuiera sur les compétences de son tuteur de stage pour la partie PEM et induction ainsi que sur un autre ingénieur du laboratoire pour la partie thermomécanique.

- Formation souhaitée :

École d'ingénieur, Bac +5

Spécialité Thermique

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Simulation numérique Eléments Finis, COMSOL, ANSYS

- Mots clés :

Pompe ElectroMagnétique, Thermique, Thermomécanique, Induction, éléments finis

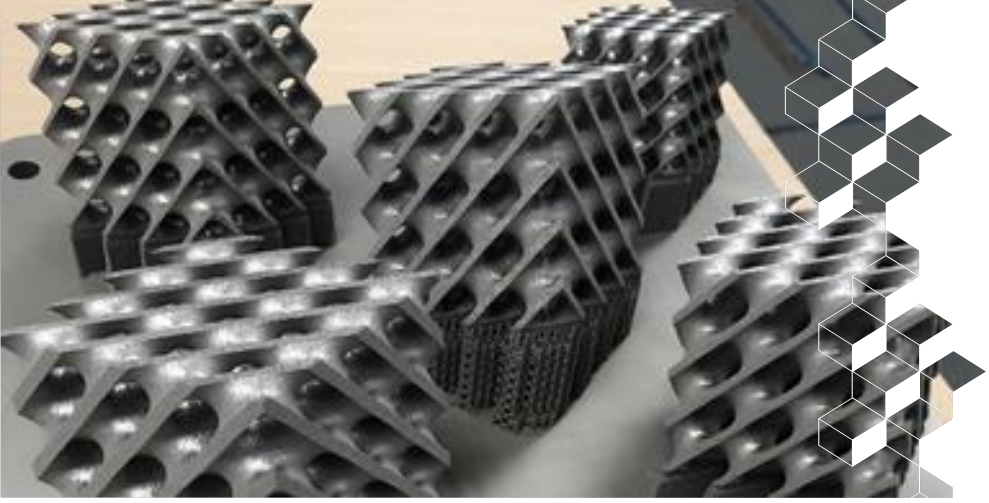
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

PAUMEL Kevin

Kevin.paumel@cea.fr



Validation de modèles CFD pour l'étude de canaux d'échange tridimensionnels

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 sélectionner une méthodologie de modélisation CFD la plus adaptée à l'étude de ces écoulements, en vue d'une comparaison avec des données expérimentales.

Le travail proposé se place dans le cadre des réacteurs nucléaires dits à sels fondus (ou *Molten Salt Reactor*, MSR). Dans ce concept de réacteur, où se combinent des contraintes dues à la neutronique, aux hautes températures et à la corrosion, la performance thermique des échangeurs de chaleur est un enjeu technique majeur.

Le LCIT conçoit un échangeur compact pour MSR, en s'appuyant sur les procédés de fabrication additive. Des géométries prometteuses de motifs d'échanges, dites TPMS (*Triply Periodic Minimal Surfaces*), ont ainsi été identifiées. Plusieurs campagnes de calculs CFD ont déjà permis de caractériser les échanges thermiques convectifs et les pertes de charges de tels motifs. On souhaite interroger ces résultats. La conception d'un banc d'essais permettant de valider expérimentalement ces calculs, au moyen d'une maquette taille réduite de l'échangeur et en fluide simulant (eau et/ou air), est en cours de réalisation.

L'objectif de ce stage sera de sélectionner une méthodologie de modélisation CFD la plus adaptée à l'étude de ces écoulements, en vue d'une comparaison avec les futures données expérimentales. Pour cela, une comparaison des différents modèles sur une géométrie de référence sera réalisée, en jouant sur différents paramètres : gestion des conditions aux limites, génération de maillages adaptés, choix du modèle de turbulence…

Ces calculs CFD seront réalisés au moyen du logiciel ANSYS FLUENT et/ou de l'outil CEA TRIO-CFD. Des modélisations de type RANS et LES sont envisagées.

En fonction de l'avancement des travaux, d'autres thématiques pourront être couvertes : variations géométriques, estimation des effets de rugosité en paroi…

- 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

- Méthode/logiciel(s):

ANSYS FLUENT, TRIO-CFD, PYTHON, CATIA V5, Solidworks

- Mots clés :

CFD, Simulation numérique, Turbulence, Thermohydraulique

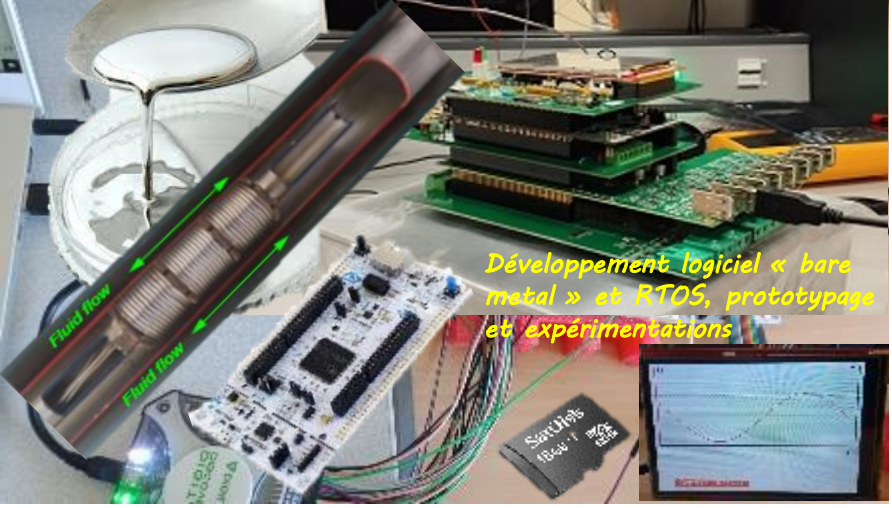
- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

RENON Clément

clement.renon@cea.fr



Développement d'un système électronique embarqué pour l'instrumentation électromagnétique

DTN/STCP/LISM

Stage orienté vers le développement d'un logiciel de pilotage d'un système électronique embarqué : développement de drivers, système temps réel et traitement du signal, test du système et expérimentations

Le Laboratoire d'Instrumentation Systèmes et Méthodes (LISM) de la Direction des Energies du CEA contribue au développement de l'instrumentation pour les systèmes d'énergie bas carbone.

Ces systèmes de production d'énergie utilisent des fluides caloporteurs pour assurer le transport de la chaleur. La connaissance du débit de ces fluides est essentielle. Le LISM conçoit des débitmètres spécifiques pour les calopoteurs métalliques. Les débitmètres électromagnétiques (DEM) et ceux à distorsion de flux (DDF) fournissent des signaux dépendant de l'interaction de leur champ magnétique avec la vitesse d'écoulement d'un métal liquide. Les DDF nécessitent d'être alimentés par un courant électrique de fréquence et de forme spécifiques. Les signaux qu'ils délivrent requièrent un traitement approprié pour en déduire la vitesse d'écoulement du fluide.

La contribution proposée s'inscrit dans le développement d'un système électronique embarqué capable de fournir le courant nécessaire à ces différents transducteurs et d'acquérir, traiter et transmettre les signaux qu'ils retournent. Le système est doté d'une interface graphique et de nombreuses fonctionnalités de transmission d'information.

Ce stage permettra de mettre en pratique les compétences suivantes :

Ce stage est en partie orienté vers la programmation pour piloter le premier prototype qui a été fabriqué. Il permettra de mettre en pratique les connaissances suivantes :

- mise en œuvre des microcontrôleurs STM32F7 et STM32H7 (cartes NUCLEO), environnements « CubeIDE »,
- programmation « Bare metal » et avec un RTOS de type FreeRTOS ou ZEPHYR,
- transmission d'informations via Bluetooth, USB, Ethernet, liaison RS485, SPI, I2C,
- mise en œuvre de support de stockage de type carte SD (Secure Digital),
- traitement du signal,
- Interface graphique, bibliothèque type LVGL
- prototypage matériel possible pour compléter le hardware déjà disponible.

Dès son arrivée, le stagiaire bénéficiera de matériels (shields) lui permettant de prototyper immédiatement chaque fonction élémentaire. L'objectif est d'avoir un prototype complet fonctionnel à la fin du stage.

- **Formation souhaitée :**

École d'ingénieur, Bac+5

Spécialités électronique, systèmes embarqués

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

CubeIDE-CubeMx, TinaSpice, DesignSpark, Kicad, excel

- **Mots clés :**

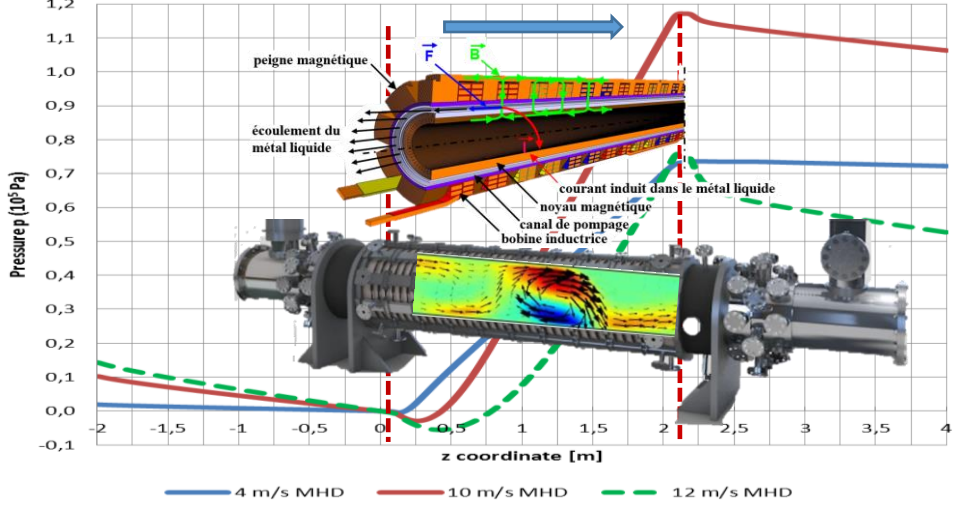
Microcontrôleur, STM32, système embarqué, CAN, ADC,

- **Possibilité de thèse :**

non

- **Contact :**

REY Frédéric
frederic.rey@cea.fr



Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un écoulement dans une pompe électromagnétique

DTN/STCP/LISM

Stage relatif à l'emploi de méthodes numériques de modélisation et simulation pour caractériser la nature de l'écoulement magnétohydrodynamique dans une pompe électromagnétique des circuits de réacteur nucléaire rapide à caloporteur sodium

Le Laboratoire d'Instrumentation Systèmes et Méthodes (LISM) contribue, entre-autres, au développement de l'instrumentation pour les réacteurs nucléaires de prochaine génération. Parmi ceux-ci, le CEA étudie des réacteurs exploitant la fission nucléaire à neutrons rapides (RNR). ils valorisent mieux le combustible nucléaire qui est une ressource non renouvelable.

Ces systèmes de production d'énergie utilisent des fluides caloporteurs dits transparents aux neutrons pour assurer le transport de la chaleur. Les métaux liquides, dont le sodium (Na) ou le plomb, font partie des caloporteurs ayant cette propriété. Leur conductivité électrique très élevée les rend particulièrement sensibles aux champs magnétiques, notamment les champs variables avec lesquels l'interaction existe même en l'absence de mouvement du fluide. Cette propriété est mise à profit par la technologie des pompes électromagnétiques (PEM) qui assurent la circulation de ces fluides métalliques grâce à l'action volumique à distance engendrée par le champ magnétique qu'elles génèrent. Ainsi, a contrario des pompes mécaniques, les PEM sont des convertisseurs d'énergie électromécanique statiques donc sans pièce en mouvement et par voie de conséquence sans risque de défaut d'étanchéité. Ainsi, malgré un rendement inhérent à leur technologie plus faible que celui des pompes mécaniques, les PEM sont préférées à ces dernières dans les circuit nucléaires où leur usage est possible, *i.e.* en deça de certains seuils de puissances au-delà desquels l'écart de rendement fait préférer les pompes mécaniques malgré tout.

Les PEM de type annulaires à inductions sont les machines dédiées aux débits volumiques les plus élevés accessibles à la technologie des PEM. Ces débits sont ceux des circuits secondaires des réacteurs à neutrons rapides utilisant le sodium (RNR-Na). A ces débits de plusieurs milliers de mètres cube par heure, la magnétohydrodynamique caractérisant l'interaction champ / fluide devient complexe. Les échanges d'énergies contenues dans le couple fluide / champ magnétiques peuvent se mettre à fluctuer de manières inacceptables et non prévus par les modèles d'intéraction simple. La prédiction de ces fluctuations a déjà fait l'objet de plusieurs études dans la perspective du dimensionnement des PEM. On propose ici d'étudier ces comportement sous l'angle de vue de leur détection et de leur caractérisation en prévision de leur prévention et de leur maîtrise.

Pour cela, la contribution proposée recourra à la modélisation numérique et à la simulation pour caractériser l'état de l'interaction magnétohydrodynamique dans les PEM à induction.

- Formation souhaitée :

École d'ingénieur, Bac+5

Spécialité physique, mécanique des fluides, turbulence, électromagnétisme, magnétohydrondynamique, MHD, modélisation numérique, simulation

- Durée du stage :

6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Logiciels de modélisation – simulation numériques du couplage électomagnétisme mécanique des fluides, logiciel de programmation structurée / objet

- Mots clés :

Électromagnétisme, mécanique des fluides, turbulence, multiphysique, MHD, magnétohydrodynamique

- Possibilité de thèse :

non

- Contact :

REY Frédéric

frederic.rey@cea.fr

Conception d'un dispositif expérimental pour l'étude physico-chimique des mécanismes de nucléation de bulles au sein d'écoulements cavitants

DTN/STCP/LTHC

Un dispositif expérimental dédié à l'étude de la cavitation dans les générateurs de vapeur est en cours de développement au CEA IRESNE. L'objectif de ce stage est de concevoir et de mettre en œuvre ce banc d'essais, afin de reproduire et de caractériser l'apparition de la cavitation dans des conditions physico-chimiques représentatives de l'eau secondaire d'un générateur de vapeur. De premiers essais exploratoires seront menés, en s'appuyant sur une instrumentation acoustique et optique pour suivre la nucléation et le développement des bulles au sein d'écoulements cavitants.

La cavitation 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, la cavitation est un enjeu industriel majeur. Des travaux récents suggèrent en particulier qu'elle pourrait jouer un rôle déterminant dans l'amorçage et la croissance de dépôts d'oxyde de fer, responsables de l'encrassement progressif des plaques entretoises des générateurs de vapeur (GV) des réacteurs à eau sous pression (REP).

Dans ce contexte, la question de l'influence des paramètres physico-chimiques du liquide se pose de manière cruciale. L'eau du circuit secondaire d'un GV de REP présente en effet une physico-chimie particulière afin de limiter la corrosion et l'encrassement des équipements. Or, ce conditionnement est susceptible de modifier profondément les mécanismes d'apparition de la cavitation, un aspect qui a jusqu'à présent été très peu étudié pour la physico-chimie particulière d'un GV. Comprendre le rôle de ces paramètres sur la formation des bulles de cavitation constitue donc une étape clé pour progresser dans la maîtrise des phénomènes de dépôt au sein des GV.

L'objectif de ce stage est de concevoir et de mettre en œuvre un dispositif d'essais de cavitation, spécifiquement dédié à l'exploration de l'influence de la physico-chimie de l'eau secondaire d'un GV. Le travail portera dans un premier temps sur la définition des spécifications hydrauliques et instrumentales du banc, incluant le choix des composants, la mise en place de la boucle et l'intégration de méthodes diagnostiques adaptées. Une fois le banc opérationnel, une première campagne d'essais exploratoires sera conduite avec pour objectif de reproduire et de contrôler l'apparition de la cavitation. Les mesures s'appuieront sur l'utilisation d'un hydrophone, permettant de suivre les émissions acoustiques caractéristiques de l'apparition de la cavitation, ainsi que sur l'ombroscopie, utilisée pour la détermination du taux de présence local de la vapeur et de la dynamique des bulles de cavitation formées au sein de l'écoulement. Dans cette première étude, la physico-chimie de l'eau sera progressivement modifiée (pH, espèces ioniques et moléculaires présentes, température, pression) afin d'explorer l'influence de ces paramètres sur le phénomène. Ceci permettra à terme d'identifier les conditions expérimentales les plus favorables à une étude approfondie de la cavitation au sein d'un GV.

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 acoustique et optique, et de développer une première compréhension de l'influence des propriétés physico-chimiques de l'eau 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 mécanique des fluides, énergétique, génie des procédés ou physico-chimie. L'encadrement sera assuré par le Dr. Jimmy Martin et le Dr. Chloé Cherpin, À l'issue du stage, une poursuite en thèse sur cette thématique est possible.

- **Formation souhaitée :**

Dernière année d'école d'ingénieur ou de Master 2, avec une spécialisation en mécanique des fluides, énergétique, génie des procédés ou physico-chimie

- **Durée du stage :**

6 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Techniques expérimentales, instrumentation en mécanique des fluides et physico-chimie

- **Mots clés :**

Thermohydraulique nucléaire, physico-chimie, cavitation, expérimentations et mesures

- **Possibilité de thèse :**

Oui

- **Contact :**

Dr. Jimmy MARTIN & Dr. Chloé CHERPIN

jimmy.martin@cea.fr
chloe.cherpin@cea.fr

Design of an experimental device for the physico-chemical study of bubble nucleation mechanisms in cavitating flows

DTN/STCP/LTHC

An experimental facility dedicated to the study of cavitation in steam generators is currently under development at CEA IRESNE. The objective of this internship is to design and implement this test bench in order to reproduce and characterize cavitation onset under physico-chemical conditions representative of steam generator secondary water. Preliminary exploratory tests will be carried out, relying on acoustic and optical instrumentation to monitor bubble nucleation and growth within cavitating flows.

Cavitation is a phenomenon that occurs when the local pressure of a liquid falls below its saturation pressure, leading to the formation of vapor bubbles within the liquid. This pressure drop typically arises when the fluid flows at high velocity, especially in regions of strong acceleration, such as near geometric restrictions. Beyond its fundamental relevance in fluid mechanics, cavitation is a major industrial issue. Recent studies in particular suggest that it may play a key role in the initiation and growth of iron oxide deposits, which are responsible for the progressive fouling of tube support plates in the steam generators (SG) of pressurized water reactors (PWR).

In this context, the influence of the liquid's physico-chemical parameters is of crucial importance. The water in the secondary circuit of a PWR SG has specific chemical conditioning in order to limit corrosion and fouling of equipment. However, this conditioning is likely to profoundly affect the mechanisms of cavitation onset, an aspect that has so far been very little studied for the specific physico-chemistry of the secondary side of PWR SGs. Understanding the role of these parameters on bubble formation therefore represents a key step toward an improved control of deposition phenomena within SGs.

The objective of this internship is to design and implement a cavitation testing facility, specifically dedicated to investigating the influence of the physico-chemistry of SG secondary water. The work will first focus on defining the hydraulic and instrumentation specifications of the facility, including component selection, loop setup, and the integration of suitable diagnostic methods. Once the facility is operational, an initial exploratory test campaign will be carried out with the aim of reproducing and controlling cavitation onset. Measurements will rely on the use of a hydrophone, to capture the characteristic acoustic emissions of cavitation inception, and on shadowgraphy, to determine the local vapor fraction and the dynamics of cavitation bubbles formed within the flow. In this initial study, the water physico-chemistry will be progressively varied (pH, molecular and ionic species, temperature, pressure) in order to explore the influence of these parameters on the phenomenon. This will ultimately make it possible to identify the experimental conditions most favorable for an in-depth study of cavitation in SGs.

This internship will provide the student with hands-on experience in the design and implementation of experimental setups in fluid mechanics, exposure to advanced acoustic and optical diagnostic techniques, and a first understanding of the influence of physico-chemical water properties on a complex multi-physics phenomenon.

The six-month internship will take place at CEA IRESNE within the Laboratory for Core and Circuit Thermal-Hydraulics (LTHC). It is aimed at a final-year engineering school or Master's student specializing in fluid mechanics, energy, process engineering, or physico-chemistry. Supervision will be provided by Dr. Jimmy Martin and Dr. Chloé Cherpin. A continuation toward a PhD on this topic is possible after the internship.

- Formation souhaitée :

Final year of engineering school or Master's degree (M2), with a specialization in fluid mechanics, energy, process engineering, or physico-chemistry

- Durée du stage :

6 months

- Méthode/logiciel(s):

Experimental techniques, instrumentation in fluid mechanics and physico-chemistry

- Mots clés :

Nuclear thermal-hydraulics, physico-chemistry, cavitation, experiments and measurements

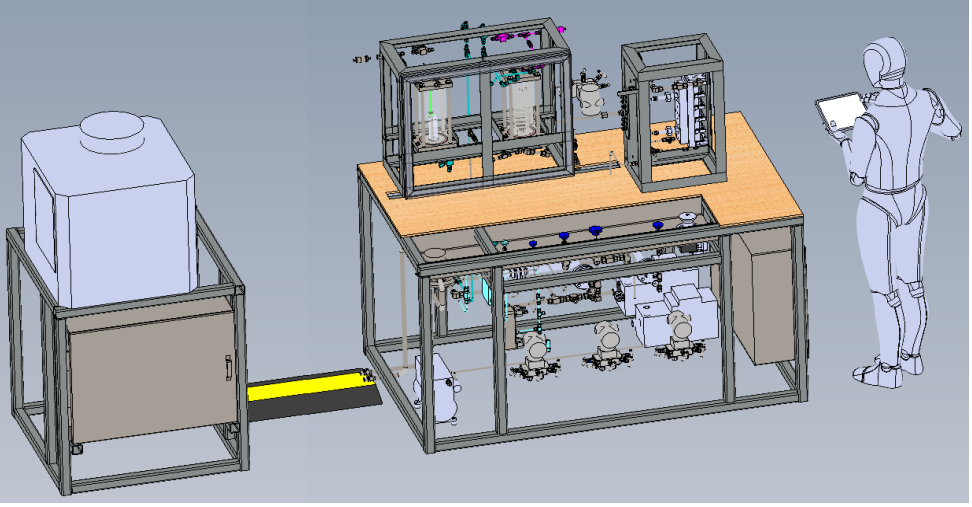
- Possibilité de thèse :

Yes

- Contact :

Dr. Jimmy MARTIN & Dr. Chloé CHERPIN

jimmy.martin@cea.fr
chloe.cherpin@cea.fr



Application de la Réalité Etendue sur des installations expérimentales

DTN/STCP/LTHC

Les plateformes POSEIDON et TOTEM à Cadarache exploitent des installations pour tester des composants de réacteurs nucléaires. Gérées notamment par le Laboratoire de ThermoHydaulique du Cœur et des circuits (LTHC), elles nécessitent un personnel qualifié. La Réalité Etendue (XR) pourrait améliorer leur exploitation. Le stage vise à intégrer la XR sur la boucle BUBULLE, une réplique pédagogique de ce type d'installations, équipée des composants réels.

Les plateformes POSEIDON et TOTEM situées sur le site de Cadarache sont des plateformes qui exploi-tent plusieurs installations expérimentales de grandes dimensions dans le domaine de l'eau et de la vapeur à haute pression et haute température. Ces installations complexes sont généralement destinées à qualifier des composants de réacteurs nucléaires actuels ou futurs. Elles sont exploitées par 2 laboratoires dont le LTHC : Laboratoire de ThermoHydaulique du Cœur et des circuits.

L'exploitation de ces installations à risques et à fort enjeu technologique nécessite du personnel qualifié qui intervient sur l'ensemble des composants et circuits afin d'assurer leur maintenance, leur réglage, leur paramétrage en fonction des essais à réaliser, et in fine la conduite globale des installations pour réaliser les programmes d'essais pour nos clients.

La Réalité Etendue (XR pour eXtended Reality) présente des fonctionnalités intéressantes dont pourrait bénéficier l'exploitation de ce type d'installations.

Le but du stage consiste à mettre en œuvre la réalité étendue sur une boucle dénommée BU-BULLE en s'inspirant d'un premier travail de maquettage déjà réalisé sur une boucle factice. La boucle BUBULLE a été fabriquée à titre pédagogique : elle reproduit à échelle réduite et conditions de pression/température abaissées le fonctionnement des installations d'essais exploitées par le LTHC. Equiper BUBULLE de la XR permettra de disposer d'un outil simple de démonstration de cette technologie sans avoir à aller sur une installation réelle.

Après avoir appréhendé le contexte et les moyens techniques à mettre en œuvre, la première partie du stage sera consacrée à comprendre ce qui a été fait sur l'installation factice (tuyaux en PVC, capteurs et actionneurs simulés, pilotage par Raspberry), puis à étudier comment l'adapter à BUBULLE (tuyaux en acier, capteurs et actionneurs réels, pilotage par contrôle commande). Enfin le stagiaire concrétisera – si possible - cette étude en réalisant concrètement la mise en œuvre sur BUBULLE.

- **Formation souhaitée :**

BAC + 2 (BUT 2 ou équivalent)

Connaissances techniques dans le domaine de la réalité étendue et si possible des échanges de données avec des systèmes en réseau.

- **Durée du stage :**

3 mois

- **Méthode/logiciel(s):**

Logiciel Unreal Engine, casque METAQUEST, protocole OPCUA, logiciel NODERED

- **Mots clés :**

Réalité augmentée, dispositifs expérimentaux, exploitation et pilotage

- **Possibilité de thèse :**

Non prévu

- **Contact :**

Eric Verloo
eric.verloo@cea.fr

2026

Retrouvez toutes nos offres de stage sur cea.fr/energies/iresne

Discover all our internship offers on cea.fr/energies/iresne

iresne@cea.fr
04 42 25 20 71

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

cea iresne