

# IRESNE<sup>2025</sup> SUJETS DE STAGES

*IRESNE INTERNSHIP SUBJECTS*

iresne@cea.fr  
04 42 25 20 71

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



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 practice*

**Sujets de stage par Département de recherché au sein de l'IRESNE :**

***Internship subjects by research department :***

Département d'études des combustibles

*Fuel Studies Département*

Département d'études des réacteurs

*Reactor Studies Département*

Département de technologie nucléaire

*Nuclear Technology Département*



# Sujets de stage Internships Subjects

## Département d'études des combustibles / *Fuel Studies Department*

Caractérisation de l'interaction entre du sodium et un combustible nucléaire de génération IV

Comment le Césium quitte-t-il le combustible nucléaire lorsque ça commence à chauffer ?

Faisabilité d'une mesure d'un profil de potentiel oxygène sur une pastille de dioxyde d'uranium

Analyse de l'iode 129 dans des déchets solides  
*Analysis of iodine 129 in solid nuclear waste*

Développement et validation de méthodes analytiques sur un nouvel équipement de mesure du rayonnement bêta

Etude de l'écoulement du milieu granulaire au cours d'un broyage pour la détermination d'un facteur de changement d'échelle expérimental

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

Optimisation du comportement au frittage des formulations métallique et céramique lors de l'élaboration d'un cermet  $\text{UO}_2$  / Molybdène

Etude de l'impression bi-matériaux de CERMET par robocasting selon des diamètres de buses différents

Mise au point d'un dispositif d'étude de la ségrégation de particules de poudre

Fabrication de pastilles combustibles  $\text{UO}_2$  : influence du dopage par un oxyde métallique

Prototypage de la simulation du pressage par une méthode sans maillage

Raffinement local adaptatif pour un solveur champ de phase HPC pour la simulation du comportement des combustibles

Intégration des équations de Cahn-Hilliard dans un solveur champ de phase HPC pour la simulation du comportement des combustibles

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

Deep-Learning pour la simulation du comportement des combustibles par champ de phase couplé à la thermodynamique CALPHAD

Développement d'un modèle de thermohydraulique multicanal

Modélisation multiphysique du frittage



# Sujets de stage Internships Subjects

## Département d'études des combustibles / *Fuel Studies Department*

Etude de l'impact de l'auto-irradiation sur les propriétés du combustible MOX (U,Pu)O<sub>2-x</sub>

Modélisation du transport de matière en phase gazeuse dans le combustible MOX (U,Pu)O<sub>2-x</sub>

Optimisation de conditions d'essais expérimentaux sur des combustibles de 4<sup>ème</sup> génération

Calcul de la composition chimique de l'interface pastille-gaine du combustible de réacteurs à neutrons rapides irradié à fort taux de combustion

Dimensionnement thermomécanique par éléments finis des éléments absorbants d'un réacteur MSR

Étude du comportement thermomécanique d'un combustible de type HTR, réalisation d'un benchmark et étude paramétrique sur le matériau combustible

Etudes thermomécaniques en support au développement de batteries nucléaires

Conception / dimensionnement thermomécaniques en support au développement d'un système de dépressurisation optimisé

Méthodes de calibration des modèles physiques pour la simulation des combustibles nucléaires

***Calibration methods for physical models in nuclear fuel simulation***

Modélisation multi-physique du comportement sous irradiation des éléments combustibles du RJH

Etude par dynamique moléculaire de la thermodiffusion dans les combustibles nucléaires

***Molecular dynamics simulation of thermodiffusion in nuclear fuel materials***

Modélisation en dynamique moléculaire et potentiels *machine learning* de la diffusion des gaz de fission dans les combustibles nucléaires

***Modeling fission gas diffusion in nuclear fuels using molecular dynamics and machine learning potentials***

Thermochimie des Produits de Fission en situation d'accidents graves de réacteurs nucléaire : composés à base de césium

***Thermochemistry of fission products in severe nuclear reactor accidents: caesium-based compounds***



# **Sujets de stage** **Internships Subjects**

## **Département d'études des combustibles / Fuel Studies Department**

Détermination à l'échelle atomique des lois de mobilité des dislocations dans l' $\text{UO}_2$   
***Atomic-scale determination of dislocation mobility laws in  $\text{UO}_2$***

Modèle multi-fidélité pour la description des propriétés thermophysiques d'oxydes mixtes d'actinides  
***Multi-fidelity model for the description of the thermophysical properties of mixed actinide oxides.***

Contribution aux études de sûreté des réacteurs à neutrons rapides à l'aide d'outils de calcul à l'échelle des atomes  
***Contribution to the nuclear safety investigations in fast-neutron reactors by means of atomistic-scale computations***

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

Développement de méthodes numériques pour la construction d'un modèle calibré de gonflement de combustible nucléaire  
***Numerical methods for the calibration of a nuclear fuel swelling model***

Simulation du comportement thermomécanique sous irradiation d'aiguilles combustibles RNR  
***Simulation of the thermomechanical behavior of SFR fuel pins under irradiation***

Simulation numérique du comportement des gaz de fission dans la microstructure des combustibles nucléaires  
***Simulation of fission gas behavior and microstructure evolution of nuclear fuels***

Plasticité cristalline de l' $\text{UO}_2$  : compréhension des rôles respectifs du glissement et de l'interaction des dislocations  
***Crystal plasticity of  $\text{UO}_2$  understanding the respective contributions of dislocation gliding and their interactions***

Un jumeau numérique pour prédire l'évolution microstructurale du joint de grains d'un combustible sous irradiation  
***A digital twin to predict the microstructural evolution of the grain boundary of a fuel under irradiation***

Analyse de sensibilité pour l'identification des principaux paramètres impactant le taux de vide dans un réacteur à sels fondus  
***Sensitivity analysis for the identification of the main parameters impacting the void ratio in a molten salt reactor***



# **Sujets de stage** ***Internships Subjects***

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

Etude à l'échelle atomique du combustible nucléaire métallique UMo: travaux préliminaires dans le contexte des réacteurs de recherche

***Atomistic investigation of the metallic nuclear fuel UMo: a preliminary study in the context of research reactors***

Développement et Vérification du Code de Thermo-mécanique Manta pour la Simulation Multiphysiques des Combustibles Nucléaires

Implémentation de lois de comportements mécaniques par différentiation automatique

Solveur Intégradifférentiel HPC Parallèle pour la Dynamique des Dislocations

***HPC Parallel Integrodifferential Solver for Dislocation Dynamics***

Simulation numérique de transferts thermiques dans une microstructure hétérogène

Étude et Intégration d'un Algorithme de Raffinement Automatique de Maillage pour la Simulation Numérique des Combustibles

Vers une représentation multiéchelle du contact frottant pour les structures élancées

***Towards a multi-scale representation of frictional contact for slender structures***



# **Sujets de stage** **Internships Subjects**

## **Département d'études des réacteurs / Reactor Studies Department**

Machine Learning pour sorties fonctionnelles : comparaison de méthodes de réduction de dimension pour variables temporelles et/ou spatiales

Développement d'un schéma de calcul simplifié de transitoire APRP dans un REP

Optimisation du schéma de pré conception de la boucle primaire d'un réacteur à sels fondus

Modélisation physico-numérique d'accidents de perte de réfrigérant primaire avec une méthode de machine learning innovante

Etude de la dynamique libre d'un réacteur à sel fondu avec le code CATHARE3

Etude CFD diphasique des écoulements Na en ébullition pour les réacteurs de 4eme génération

Modélisation du comportement en convection naturelle d'un réacteur à sels fondus – Application au réacteur ARAMIS

Conséquences d'un accident de fusion du cœur sur le confinement d'un Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au sodium liquide (RNR-Na)

Développement d'un outil simplifié pour l'étude d'un accident de perte de débit primaire sur réacteur à haute température

Méthodologie de déploiement d'une flotte de réacteurs nucléaires innovants piloté par les besoins du réseau

Contribution au développement d'un simulateur de réacteur au sodium basé sur CATHARE3

Simulation Monte Carlo des impulsions d'une chambre à fission

Portage sur FPGA d'algorithmes de traitement de signaux issus de SiPM

Développement d'une électronique front-end multivoies basée sur des SiPM pour lire des fibres optiques couplées à des détecteurs scintillants.

Etude exploratoire d'un dosimètre constitué de xénon piégé sur une zéolithe dopée à l'argent

Mesure de température en réacteur nucléaire de recherche par thermocouple : étude par simulation et expérience des paramètres d'influence.

Evolution d'un outil de traitement de la dosimétrie. Définition, développement et validation sur des expériences traitées manuellement



# **Sujets de stage** **Internships Subjects**

## **Département d'études des réacteurs / Reactor Studies Department**

Portage d'une application de dépouillement de données nucléaires en C++.

Qualification d'un système de mesure de bruit neutronique

Portabilité d'une Interface Homme Machine développée en JAVA et le logiciel d'analyse de données R d'une plateforme MSWindows à une plateforme Linux et ajout de fonctionnalités selon les besoins des expérimentateurs.

Amélioration de l'architecture réseau de la supervision du réacteur expérimental CABRI

Optimisation de la conception RNR vis-à-vis des services rendus à des parcs nucléaires industriels

Détermination de l'impact du suivi de charge sur la composition des assemblages irradiés d'un SMR

Etudes neutroniques de caractérisation d'un cœur de RNR-Na innovant

Mise en données du parc nucléaire européen pour les études de scénarios

Étude de l'impact du couplage neutronique-thermohydraulique en Réacteur à Sels Fondus : de la maquette critique au démonstrateur

Déploiement d'un réacteur à sel fondu transmutateur d'actinides mineurs : Impact sur le cycle et comparaison avec l'AMR ARAMIS

Analyse neutronique de l'expérience STEK pour la validation des outils de calcul scientifique.

Quantification des incertitudes dans la modélisation multiphysique de réacteurs

Validation des calculs neutroniques de configurations dégradées au cours d'accidents graves de cœurs rapides sodium

Mise en œuvre et validation de schémas de calcul neutronique double niveau dans le code APOLLO3

Validation numérique du code APOLLO3® à l'aide de codes open source

Microscopic nuclear structure models to study de-excitation process in nuclear fission

Effets quantiques dans le modèle de masse FRLDM



# **Sujets de stage** **Internships Subjects**

## **Département d'études des réacteurs / Reactor Studies Department**

Interprétation d'expériences de combustibles irradiés avec la nouvelle bibliothèque de données nucléaires JEFF-4.0

Simulation Monte-Carlo de campagnes expérimentales de mesure de neutrons retardés de l' $^{238}\text{U}$

Validation des fonctionnalités de calcul de perturbation exacte pour l'estimation d'incertitudes technologiques sur des calculs de réacteur

Validation des outils de calcul neutroniques pour les réacteurs à haute température (HTR)

Simulation du Réacteur Jules Horowitz (RJH) à l'aide de l'outil INCA

Performances de l'estimateur eTLE pour des applications de type imagerie

Validation d'une méthode avancée de reconstruction de la puissance fine pour le jumeau numérique du RJH

Propagation des incertitudes dues aux données nucléaires d'un SMR en utilisant des méthodes innovantes de type bases réduites

Propagation d'incertitudes de type technologique sur la puissance résiduelle

Modélisation des échauffements nucléaires dans le réacteur LVR-15

Equipe cellules chaudes : Etude de faisabilité pour l'implantation d'une cellule maquette sur TOTEM

Fonctionnement RJH : Données d'entrée

Fonctionnement RJH : Architecture opérationnelle et impact de la maintenance

Modélisation neutronique d'un essai de chute de barre dans le RJH

Modélisation multi-physique du comportement sous irradiation des éléments combustibles du RJH

Conception neutronique d'un dispositif innovant pour la validation de combustibles à plaques

Conception thermohydraulique d'un dispositif innovant pour la validation des combustibles à plaque

Optimiser la disponibilité du Réacteur Jules Horowitz

Adaptation spectrale pour la production de radioéléments artificiels dans le RJH



# **Sujets de stage** ***Internships Subjects***

## **Département de technologie nucléaire / Nuclear Technology Department**

Interprétation de l'essai d'interaction corium-eau sur le dispositif KROTOS

Modélisation de la cinétique d'oxydation de matériaux à haute température

Obtention de nouvelles compositions de corium à haute température par réaction chimique

Développement d'interfaces pour des codes de calcul scientifique

***Development of interfaces for scientific computing codes***

Assimilation de données de tension de surface pour améliorer la modélisation thermodynamique des liquides

***Assimilation of surface tension data to improve thermodynamic modeling of liquids***

Validation des modèles de turbulence d'un code CFD sur les Accidents Graves des réacteurs nucléaires

***Validation of turbulence models in a CFD code for severe nuclear reactor accidents***

Simulation numérique du transfert de chaleur dans un lit de débris

DIADEME - logiciel de diagnostic des défauts de gainage combustible dans les REP : Développement et validation

Optimisation de la tenue en corrosion d'une céramique électrolyte dans le sodium liquide

Reconstruction tomographique 3D de sources neutroniques par panneaux BCS (Boron Coated Straw)

Évaluation des capacités du code PHITS pour la simulation des mesures neutroniques avec scintillateurs plastiques PVT pour la caractérisation des déchets radioactifs

Application des méthodes statistiques avancées pour la caractérisation des déchets radioactifs

Etude par simulation MCNP de la mesure en ligne de la concentration en hydrogène dans les analyseurs de minerais et de ciment

Caractérisation d'aimants NdFeB par activation neutronique en vue de leur recyclage

Modélisation Monte-Carlo de sondes diagaphiques nucléaires en environnement de puits pétroliers tubés



## **Sujets de stage** **Internships Subjects**

### **Département de technologie nucléaire / Nuclear Technology Department**

Étude des interactions compétitives chez les chiroptères par trajectographie acoustique 3D et leur modification sous pression anthropique : cas de la pollution lumineuse  
***Study of competitive interactions in chiropterans using 3D acoustic trajectography and their modification under anthropic pressure: the case of light pollution***

Tests de protocoles d'inventaires des orthoptères, Evaluation de leur complémentarité  
***Tests of orthopteran survey protocols, evaluation of their complementarity***

Quantification des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact  
***Quantification of greenhouse gas emissions in impact studies***

Analyse corrélatoire et spectrale de données de température et de conductivité électrique en forage en vue d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère crétacé sur le site CEA de Cadarache  
***Correlative and spectral analysis of temperature and electrical conductivity data from drilling to improving knowledge of the hydrodynamic functioning of the Cretaceous aquifer on the CEA Cadarache site.***

Etude des capacités d'infiltration et de ruissellement des sols pour l'établissement d'un bilan hydrique spatialisé  
***Hydrogeology, Hydrology, Water balance, Infiltration, Runoff***

Intégration automatique et analyse des données piézométriques pour l'optimisation du suivi en continu de la nappe alluviale du site de Marcoule

Conception d'une section d'essais pour soufflet sodium

Etude CFD d'une maquette expérimentale d'échangeur de chaleur

Dimensionnement thermomécanique d'une manchette thermique à haute température pour la conception d'un banc de qualification en fatigue

Amélioration de l'outil d'analyse fatigue-fluage selon le RCC-MRx

Étude d'un procédé de lavage innovant utilisant des solutions salines – contribution à la définition des mécanismes réactionnels

Etude numérique des écoulements turbulents dans les sous assemblages de REP  
***Numerical study of turbulent flows in the fuel assemblies of PWR***

Développement d'un protocole de caractérisation ultrasonore du mortier de colis de déchets

Etude du bruit de l'ébullition dans un GV



# **Sujets de stage** ***Internships Subjects***

**Département de technologie nucléaire / Nuclear Technology Department**

Développement d'un système électronique embarqué pour l'instrumentation électromagnétique

Étude et optimisation du processus de Fabrication Additive par Fused Filament Fabrication (FFF) en vue de la fabrication de composant de capteurs

Etude et modélisation d'un procédé ultrasonore de détection d'impuretés dans le sodium liquide

Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un écoulement dans une pompe électromagnétique

Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un transducteur électromagnétique DDF

Développement de traitements d'images pour la vélocimétrie par imagerie de particules

Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un transducteur électromagnétique de mesure de débit

Application de méthodes d'imageries ultrasonores pour la détection de défaut de soudure en réacteur

Simulation CFD et interprétation d'essais de convection naturelle avec auto-vaporisation gravitaire en piscine de refroidissement

Etude de la mesure de débit dans une canalisation par détection des bruits thermiques

Conception et tests de dispositifs expérimentaux pour l'étude de l'ébullition en conditions réacteur

# Présentation de l'IRESNE

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

---

L'IRESNE est l'Institut de REcherche sur les Systèmes Nucléaires pour la production d'Energie bas carbone. Créé le 1er février 2020 par le CEA, l'IRESNE rassemble une équipe de 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. Après impression, séchage et déliantage, la pièce a été frittée pour rendre la céramique pratiquement totalement dense.

©A.Aubert /CEA

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

©A.Aubert /CEA



# **IRESNE : Un institut du CEA situé 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

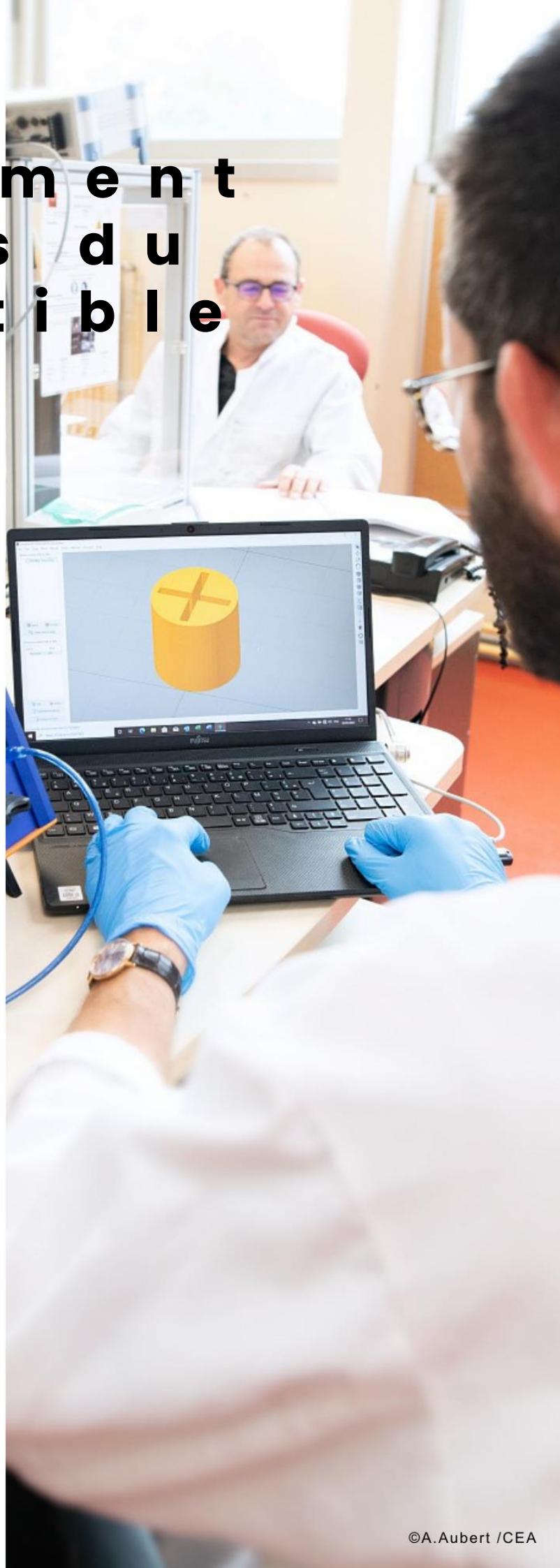
# Département d'Etudes du Combustible

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).



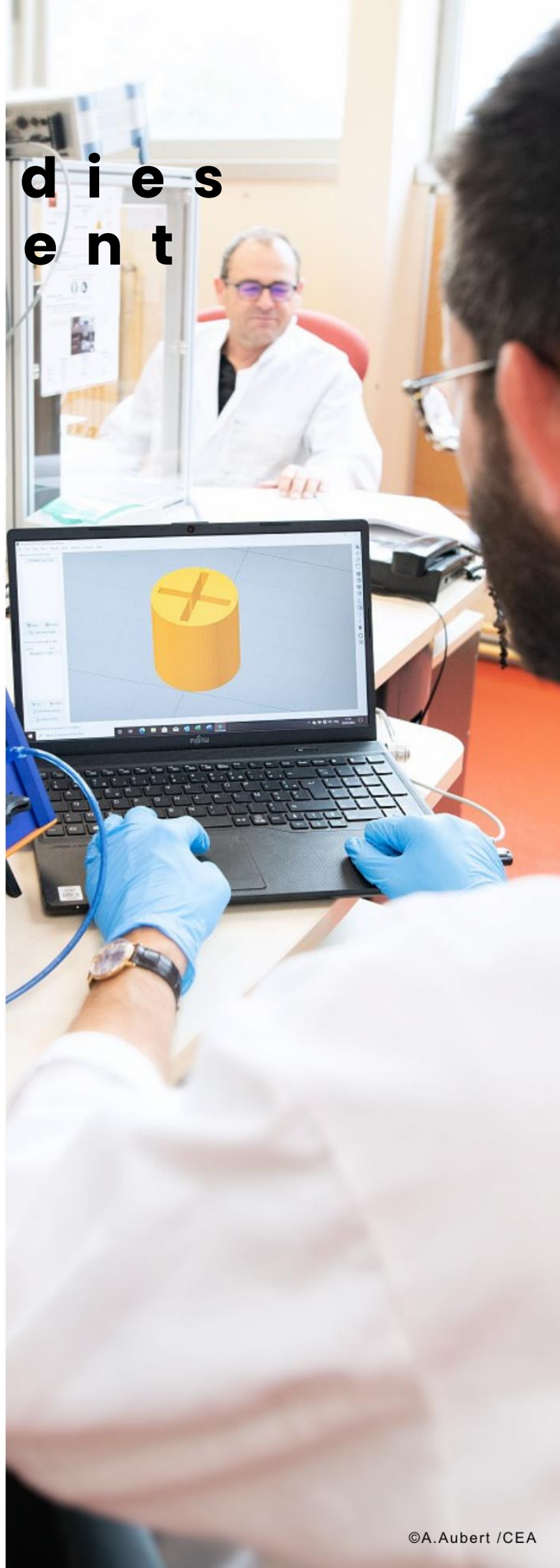
# Fuel Studies Department

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:

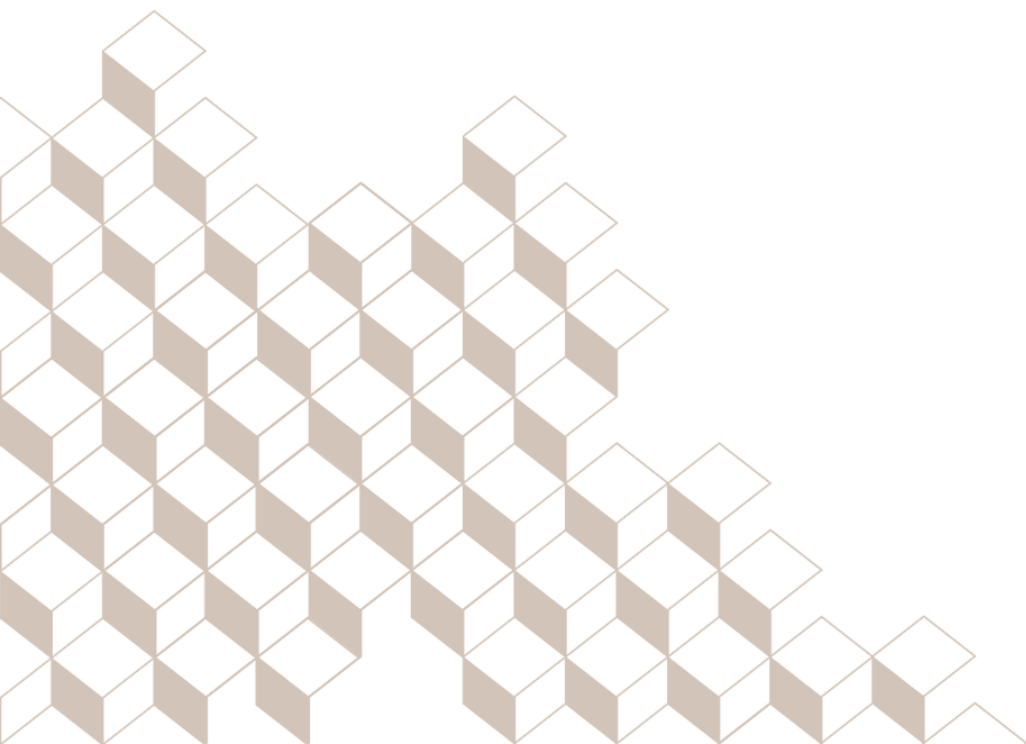
- Analysis, Elaboration, Experimentation and Examination of Fuels Unit (SA3E).
- Studies and Simulation of Fuel Behavior Unit (SESC),
- Operating and Fuel Treatment Unit (SETC).



# S A 3 E

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

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





# Caractérisation de l'interaction entre du sodium et un combustible nucléaire de génération IV

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 de la gaine de 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 conteneur 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 sur le contexte 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 de 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):

## ■ Mots clés :

## ■ Possibilité de thèse :

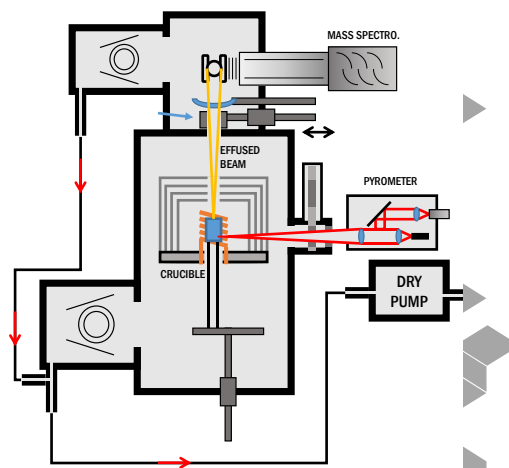
Non

## ■ Contact :

DESGRANGES Lionel

Lionel.desgranges@cea.fr





Comment le Césium quitte-il le combustible nucléaire lorsque ça commence à chauffer ?

DEC/SA3E/LAMIR

**Le CEA mène des études, avec ses partenaires EDF et JRC-Karlsruhe, sur le relâchement des produits de fission volatils du combustible nucléaire en situation accidentelle. L'objectif étant de gagner des marges sur la sûreté en réacteur nucléaire. Le stagiaire s'intéressera au relâchement du Césium hors du combustible qu'il étudiera en exploitant des bases de données d'expériences déjà réalisées et en étudiant des matériaux simulants de  $\text{UO}_2$  dopés en césium.**

La prévention des accidents nucléaires est dimensionnée par une évaluation de la quantité des radionucléides potentiellement dispersables dans l'environnement pour une séquence accidentelle donnée. Le CEA participe à cette évaluation en réalisant des mesures sur les radionucléides émis hors du combustible nucléaire lors d'un transitoire en température grâce au dispositif MERARG (voir image ci-dessus à gauche), de manière complémentaire avec des mesures effectuées au JRC-Karlsruhe avec la méthode KEMS (voir image ci-dessus à droite). Ces données sont ensuite utilisées par EDF pour garantir la sûreté du fonctionnement des réacteurs nucléaires auprès des autorités de sûreté.

Ce stage est plus particulièrement consacré à l'étude du relâchement des produits de fission volatils, tel que le césium. Aujourd'hui, il existe au CEA et au JRC-Karlsruhe des résultats expérimentaux sur le relâchement de cet élément (éventuellement corrélé avec le relâchement d'autres produits de fission). L'objectif premier du stage sera de faire un inventaire de ces résultats, et lorsque cela sera possible une intercomparaison entre les données acquises au CEA et celle acquises au JRC-Karlsruhe. Pour améliorer cette intercomparaison, l'objectif second

du stage est de mettre en place une mesure du relâchement de césium sur deux échantillons identiques à Cadarache et à Karlsruhe. Les échantillons utilisés seront des échantillons simulants le combustible irradié, de l' $\text{UO}_2$  dopé avec du césium, pour permettre un transport plus aisé des échantillons entre Cadarache et Karlsruhe.

Pour ce faire le stagiaire séjournera à Karlsruhe pendant l'essentiel de la durée du stage. Il participera à la sélection voire la fabrication des échantillons simulants l'équipe responsable.

Pour optimiser son séjour au JRC, le stagiaire passera au préalable quelques semaines à Cadarache pour étudier la base de données CEA et partager avec ses encadrants sur le contexte du relâchement des produits de fission. De même, il terminera son stage par une période à Cadarache où il présentera les résultats de ses travaux.

Le stagiaire devra avoir de bonnes connaissances en sciences de 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 :

Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur en sciences de matériaux, physique ou chimie du solide.

#### ■ Durée du stage :

5-6 mois

#### ■ Méthode/logiciel(s) :

#### ■ Mots clés :

#### ■ Possibilité de thèse :

Non

#### ■ Contact :

DESGRANGES Lionel

Lionel.desgranges@cea.fr



# Faisabilité d'une mesure d'un profil de potentiel oxygène sur une pastille de dioxyde d'uranium.

DEC/SA3E/LAMIR

**Le SA3E souhaite se doter d'une mesure locale de potentiel oxygène pour ses activités de recherche. Le stage aura pour objectif de démontrer la faisabilité de cette mesure, en mettant en œuvre les outils du service pour une expérience de démonstration, que le stagiaire réalisera.**

Le SA3E étudie le relâchement des composés radioactifs hors de céramique nucléaire pour améliorer la sûreté des combustibles nucléaires. La forme chimique des éléments radioactifs qui sont émis dépend de la composition chimique de la céramique, et notamment de son potentiel oxygène. Le SA3E possède un système, de type pile électrochimique, qui permet de déterminer le potentiel oxygène à l'intérieur d'un échantillon homogène. Cependant le combustible nucléaire n'est pas homogène mais présente un gradient de composition chimique, dû en partie à l'existence d'un gradient de température dans la pastille lorsque cette dernière est irradiée dans un réacteur nucléaire. Afin de mieux décrire le combustible nucléaire, il est nécessaire de disposer d'une mesure locale du potentiel oxygène dans une pastille de céramique nucléaire,

L'objectif du stage est de réaliser des mesures locales de potentiel oxygène avec une expérience de démonstration qui prouvera la faisabilité technique de cette mesure. Pour cela le stagiaire travaillera avec deux laboratoires du service,

Au sein du LAMIR, le stagiaire contribuera à la mise en route d'une microcarotteuse, et l'utilisera pour réaliser des pastilles de dioxyde d'uranium annulaires. Il réalisera un

traitement thermique sous gradient de température avec ces pastilles annulaires, dans l'installation Durance. Le traitement thermique sous gradient a pour objectif de produire un gradient de potentiel oxygène dans la pastille annulaire. Ensuite, il mettra à nouveau en œuvre la microcarotteuse pour prélever des échantillons à diverses positions radiales de la pastille,

Au sein du LCPC, le stagiaire effectuera des mesures de potentiels oxygène sur les échantillons qu'il aura prélevés. Il se sera assuré au préalable que la forme des échantillons est compatible avec une mesure dans la pile électrochimique. Il pourra finalement déterminer le profil de potentiel oxygène dans la pastille annulaire avec les résultats acquis sur des échantillons prélevés à différents positions radiales,

On recherche un profil de type BUT 3<sup>ème</sup> année en mesure physique ou instrumentation,

## ■ Formation souhaitée :

BUT 3<sup>ème</sup> année

Ou M1 en instrumentation

## ■ Durée du stage :

4-5 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

microcarottage, traitement thermique, pile électrochimique

## ■ Mots clés :

Potentiel oxygène ,

Mesure locale

## ■ Possibilité de thèse :

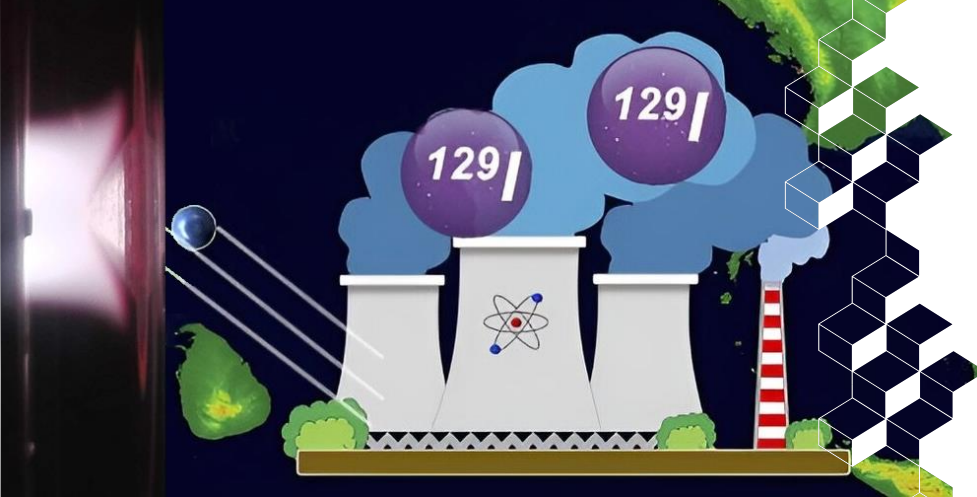
Non

## ■ Contact :

Desgranges Lionel,

lionel.desgranges@cea.fr





# Analyse de l'iode 129 dans des déchets solides

DEC/SA3E/LARC

Ce stage, au sein du Laboratoire d'Analyses Radiochimiques et Chimiques, s'inscrit dans le cadre d'une étude visant à mettre au point une méthode d'analyse de l'iode 129 dans des échantillons de déchets solides. Le cœur de ce travail s'articulera autour de la mise en solution des échantillons et de la purification de l'iode.

## 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. Les mesures relatives à l'<sup>129</sup>I sont donc axées sur la gestion du stockage des déchets nucléaires et sur 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, acier...) permettra de répondre aux enjeux relatifs au devenir des déchets de l'industrie nucléaire.

## Objectifs et missions du stage :

### - Mise au point et validation d'une méthode de mise en solution d'échantillons solides

Le premier objectif du stage sera de déterminer expérimentalement les conditions de mise en solution d'échantillons de bétons et de cendres les plus appropriées pour l'analyse de l'iode. Les méthodes envisagées sont la minéralisation en milieu acide par micro-ondes ou sur plaque chauffante avec piégeage de l'iode gazeux.

### - Mise au point d'une méthode de purification de l'iode

L'étape de purification peut améliorer la limite de détection par la concentration de l'échantillon et l'élimination de certains composés qui pourraient affecter la mesure de l'iode (par exemple, les sels ou les interférents). La purification sera réalisée par extraction en phase solide en utilisant une résine commerciale. Les conditions de séparation seront optimisées en utilisant des solutions de minéralisation dopées en iode stable (<sup>127</sup>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 la mise en solution et de la purification 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 outils 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] Llopert-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 phase solide, chromatographie préparative

## ■ Mots clés :

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

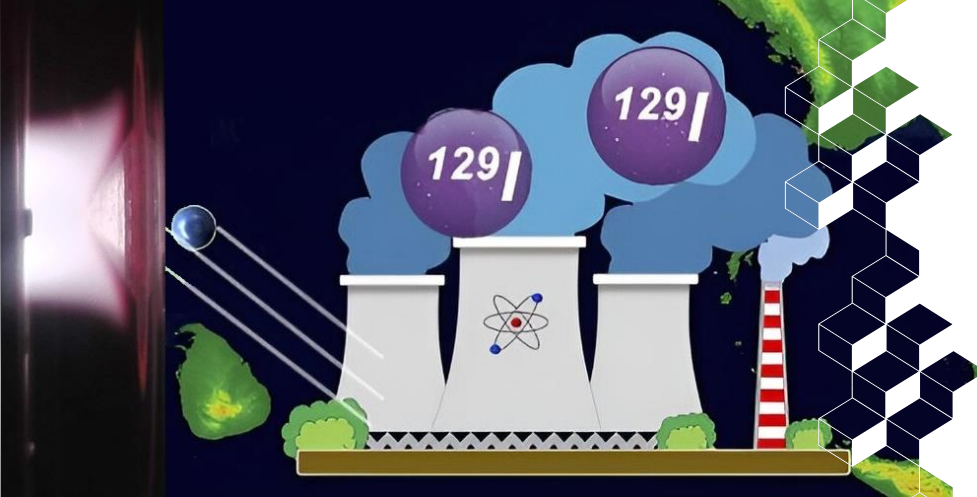
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

Mathieu MARTINEZ  
mathieu.martinez@cea.fr





# Analysis of iodine 129 in solid nuclear waste

DEC/SA3E/LARC

**This internship in the Radiochemical and Chemical Analysis Laboratory (LARC) aim to develop a method for the analysis of iodine 129 in nuclear solid waste samples. The focus of this work will be on dissolving the samples and purifying the iodine for ICP-MS analysis.**

## Background :

The nuclear industry produces waste that needs to be characterized before it can be processed. In particular, the concentrations of various radionuclides need to be determined. Iodine 129 is a long-lived radionuclide produced during uranium fission, and its physico-chemical properties give it a high potential for mobility in the environment. Therefore,  $^{129}\text{I}$  measurements are required for the management of nuclear waste storage and for environmental monitoring. In this context, the Radiochemical and Chemical Analysis Laboratory (LARC) develops analytical methods to meet the specifications of radioactive waste treatment processes.

The development of a method for quantifying iodine 129 in solid waste (concrete, ash, steel, etc.) will help to meet the challenges of nuclear industry waste management.

## Objectives and tasks of the internship :

### - Development and validation of a method for dissolving solid samples

The first objective of the internship will be to experimentally determine the best conditions for dissolving concrete and ash samples for iodine analysis. The methods considered are acid digestion in a microwave or on a hot plate with trapping of gaseous iodine.

### - Development of an iodine purification method

The purification step can improve the detection limit by concentrating the sample's iodine and eliminating compounds that could affect the iodine measurement (e.g. salts or interferences). Purification will be carried out by solid phase extraction (SPE) using a commercial resin. Separation conditions will be optimized using digested solutions spiked with stable iodine ( $^{127}\text{I}$ ).

## Main tasks:

- **Contributing to the development of an experimental approach** based on the initial results already obtained in the laboratory, and using the scientific literature.
- **Optimization of digestion and purification using the laboratory's equipment.**
- Characterization of solutions by ICP-AES, ICP-MS, ion chromatography, etc.
- **Quantification of iodine 129 by ICP-MS/MS after preparation of standards and samples.**
- **Analysis and interpretation of obtained results**

## Benefits of the internship for the candidate:

You will have a full research experience in analytical chemistry, as this internship involves both sample preparation and analysis techniques, as well as an experimental approach for method validation.

As this project is taking place in an Classified Environmental Protection Facility, you will be familiar with laboratory work involving radioactive samples.

This project involves a wide range of technical skills which can be applied directly in various areas of industry and research (energy, environment, chemical and pharmaceutical industries).

## References

- [1] IRESNE - LARC
- [2] Carrier *et al.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2023)
- [3] Nottoli *et al.* Applied Radiation and Isotopes (2014)
- [4] Llopert-Babot *et al.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2022)

## Formation souhaitée :

Master 2 or engineering school in analytical chemistry

## Durée du stage :

4 to 6 month

## Méthode/logiciel(s):

Microwave digestion, ICP-MS, solid phase extraction, preparative chromatography

## Mots clés :

Analytical chemistry, characterization, nuclear waste, chromatography, mass spectrometry

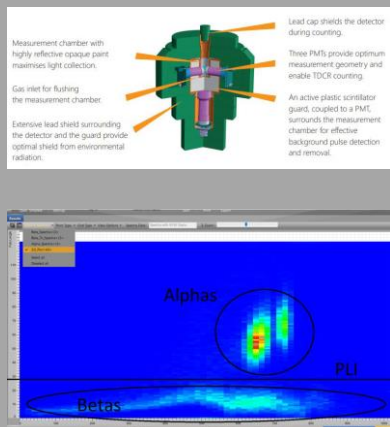
## Possibilité de thèse :

No

## Contact :

MARTINEZ Mathieu  
mathieu.martinez@cea.fr





## Développement et validation de méthodes analytiques sur un nouvel équipement de mesure du rayonnement bêta

DEC/SA3E/LARC

Ce stage, au sein du Laboratoire d'Analyses Radiochimiques et Chimiques (LARC), s'inscrit dans le cadre de l'installation début 2025 d'un nouveau compteur à scintillation liquide ultra bas bruit de fond pour l'analyse du rayonnement bêta (Hidex ULLA).

### Contexte

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

Le laboratoire dispose depuis 2001 de deux compteurs à scintillation liquide PerkinElmer Quantulus 1220 permettant de mesurer les radionucléides émetteurs bêta à de très faibles activités, principalement pour caractériser les déchets de l'industrie nucléaire. La société PerkinElmer a arrêté la fabrication de ce modèle ultra bas bruit de fond en 2015 et va stopper le renouvellement des contrats de maintenance au cours de l'année 2025. Le LARC a donc fait l'acquisition d'un compteur ultra bas bruit de fond Hidex ULLA.

Le but principal de ce stage est la validation des méthodes analytiques déjà existantes sur le nouvel appareil.

### Objectifs

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

- Détermination du bruit de fond et des limites de détection atteignables ;
- Validation de l'analyse des émetteurs bêta suivant :  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{55}\text{Fe}$  ;
- Rédaction d'un manuel d'utilisation et de fiches réflexes de l'appareil et du logiciel associé ;
- Validation des méthodes pour l'analyse des émetteurs bêta dans des matrices complexes (graphite, béton, alliages etc ...)
- Validation de la méthode de triple marquage permettant l'analyse simultanée du  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  et  $^{36}\text{Cl}$  ;
- Développement d'une méthode pour la mesure de l'activité alpha globale et bêta globale ;
- Application de la méthode du Rapport des Triples Coïncidences sur les Doubles (TDCR) pour l'analyse des émetteurs bêta  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$  ;

- Test de l'efficacité d'un nouveau liquide scintillant non corrosif pour l'analyse du  $^{14}\text{C}$ .

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

A l'issue de ce stage, le stagiaire aura développé une expérience opérationnelle dans le domaine de la mesure du rayonnement bêta par la technique de scintillation liquide.

Le développement et la validation de nouvelles méthodes (mesure de l'activité alpha globale et bêta globale, TDCR), notamment via la mise en place d'un plan d'expérience, permettra au stagiaire de développer son esprit critique.

Enfin, la minéralisation d'échantillons par micro-onde est une technique indispensable et applicable dans la plupart des laboratoires d'analyse. La variabilité importante du type de matrices complexes analysées au sein du LARC permettra au stagiaire d'acquérir une expertise sera un atout pour le stagiaire dans ses futures fonctions.

### Références

[1] Alliot, Cyrille, Éric Ansoborlo, et Nicolas Baglan. Mesure du rayonnement Bêta: Dossier de Recommandations pour l'Optimisation des mesures - DROP Bêta. CETAMA, Les Ulis: EDP Sciences, 2021. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2308-6>.

[2] NF EN ISO 11929-4 | Juillet 2023, « Détermination des limites caractéristiques (seuil de décision, limite de détection et limites de l'intervalle élargi) pour le mesurage des rayonnements ionisants - Principes fondamentaux et applications »

[3] Sabot, Benoît, Chavdar Dutsov, Philippe Cassette, et Krasimir Mitev. « Performance of Portable TDCR Systems Developed at LNE-LNHB ». Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1034 (juillet 2022): 166721. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166721>.

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur

Parcours en chimie analytique

### ■ Durée du stage :

4 – 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Scintillation liquide, logiciel VALO, minéralisation micro-onde, TDCR, Triple marquage

### ■ Mots clés :

Chimie analytique, scintillation liquide, TDCR, Triple marquage, démantèlement, environnement

### ■ Possibilité de thèse :

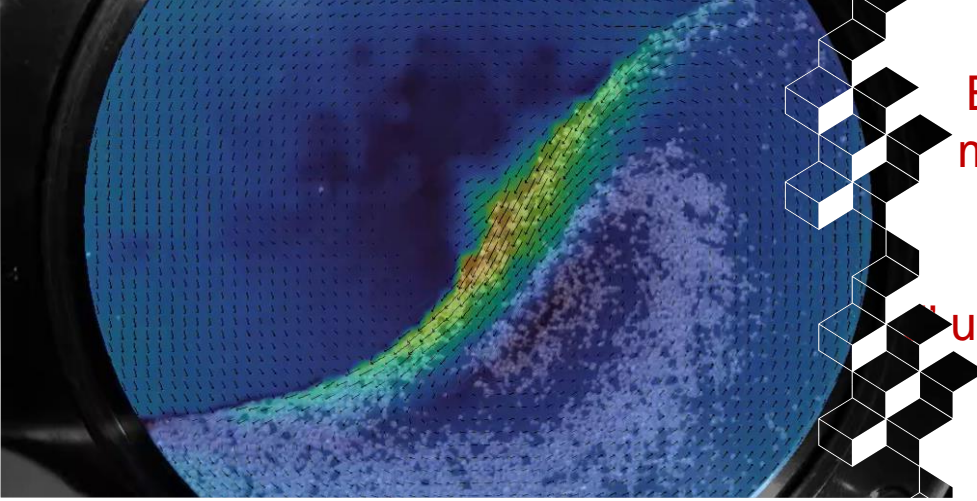
Non

### ■ Contact :

DUVAL Bastien

Bastien.DUVAL@cea.fr





# Etude de l'écoulement du milieu granulaire au cours d'un broyage pour la détermination d'un facteur de changement d'échelle expérimental

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 et ses effets d'échelle. Plus précisément, le but du stage est d'étudier les grandeurs caractéristiques de l'écoulement d'une poudre dans un cylindre tournant via une instrumentation pour en déterminer des lois de comportement en support à des études de modélisation.**

Des essais expérimentaux d'écoulements de poudres d'intérêt seront réalisés dans la cuve d'un broyeur de laboratoire avec un suivi par imagerie et avec des capteurs définis. Les effets du taux de remplissage, de la vitesse de rotation de la cuve et de la nature des matériaux seront étudiées pour différentes tailles de cuve. Les relations entre les paramètres du système et les grandeurs permettant de définir l'écoulement du milieu granulaire (profil de surface, champs de vitesse, ...) seront établies.

En parallèle, des traitements numériques d'images et données issues de capteurs seront développés pour extraire les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du milieu granulaire.

## Objectifs principaux :

- Réalisation et analyse des essais expérimentaux,
- Comparaison des résultats,
- Détermination d'un facteur de changement d'échelle expérimental,

## Principales étapes :

- Recherche et analyse bibliographique avec acquisition des connaissances des mécaniques de fragmentation des particules, régimes d'écoulement

du milieu granulaire dans un cylindre tournant

- Prise en main du logiciel EyePIV,
- Réalisation des essais expérimentaux,
- Analyse et comparaison aux modèles DEM existants

A l'issue de ce travail, le/la stagiaire disposera de compétences dans le domaine des milieux divisés notamment sur les propriétés d'écoulement des particules constituant une poudre. Ces compétences sont recherchées dans différentes applications industrielles et environnementales.

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

5/6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, traitement d'images

## ■ Mots clés :

Ecoulement, milieu granulaire, broyeur, changement d'échelle, PIV

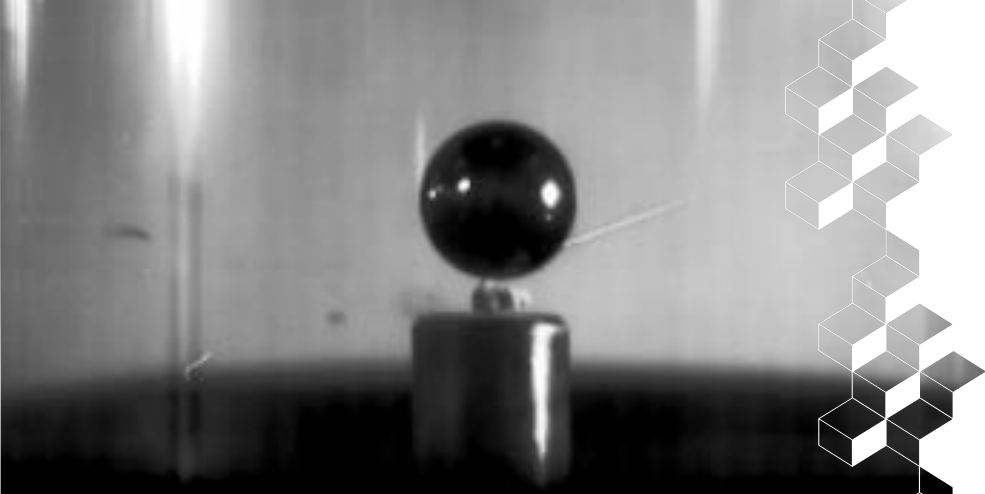
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

ROUBAUD Christophe  
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. Plus précisément, le but du stage est de faire évoluer la conception d'un dispositif pour déterminer, en support à des études de modélisation, les propriétés mécaniques en compression dynamique de particules : mono-particule et lit de poudres céramiques**

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. Cela conduira à identifier les paramètres à étudier expérimentalement pour mieux comprendre la fragmentation.

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'image l'impact de fragmentation, mesurer les fragments, etc...

A l'issue d'une étude de conception mécanique, une expression de besoin sera ensuite émise envers des fournisseurs pour faire évoluer le dispositif de mesure ou en acheter un nouveau.

Des essais de broyage de poudres modèles dans un broyeur à boulets seront également réalisés en vue d'établir un lien entre les propriétés mécaniques des particules initiales fragmentées via le dispositif et les caractéristiques des poudres broyées.

## Objectifs principaux :

- Faire évoluer la conception du dispositif de compression dynamique pour des particules de poudre dans la gamme 250-2000  $\mu\text{m}$  et suivre ses étapes de fabrication,

- Mise au point du dispositif de compression dynamique,

- Etude expérimentale de la fragmentation dynamique de poudre modèles,

- Réalisation d'essais de broyage sur poudres modèles.

## Principales étapes :

- Recherche et analyse bibliographique : techniques de fragmentation de particules, analyse des données issues de la fragmentation, propriétés mécaniques des particules
- Redimensionnement et conception du dispositif de référence,
- Démarches commerciales d'achat, suivi des étapes de fabrication et d'instrumentation chez le / les fournisseur(s)
- Participation à des essais de broyage et caractérisation de poudres modèles sur un dispositif existant.

A l'issue de ce travail, le/la stagiaire disposera de compétences dans le domaine des milieux divisés notamment sur les propriétés mécaniques des particules constituant une poudre. Ces compétences sont recherchées dans différentes applications industrielles et environnementales.

## ■ Formation souhaitée :

2<sup>ème</sup> / 3<sup>ème</sup> 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 :

Oui

## ■ Contact :

ROUBAUD Christophe  
christophe.roubaud@cea.fr





# Optimisation du comportement au frittage des formulations métallique et céramique lors de l'élaboration d'un 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. 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 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 optimiser. En particulier, on cherche à optimiser la compatibilité des deux formulations de pâtes adaptées au dispositif d'extrusion afin de les rendre compatibles lors du co-frittage.

Pendant le stage, les thèmes suivants seront développés :

- Modification des formulations des

pâtes pour un ajustement des retraits au frittage.

- Caractérisations rhéologiques des formulations à l'aide d'un rhéomètre capillaire.
- Etudes dilatométriques des différentes formulations
- Réalisation d'impressions bi-matériaux 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 ou mécanique.

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Simplified 3D, cura

## ■ Mots clés :

Fabrication additive, CERMET

## ■ Possibilité de thèse :

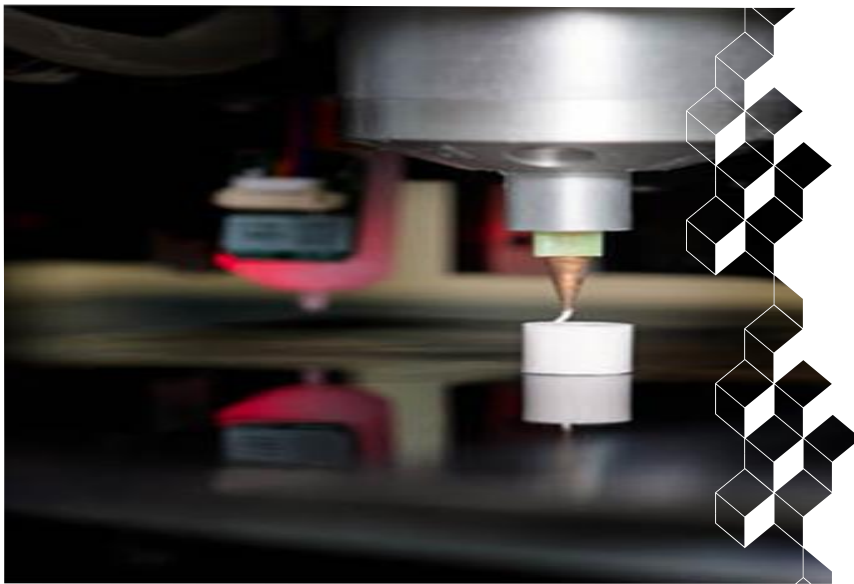
Oui au sein du service sur d'autres thématiques matériaux

## ■ Contact :

FIQUET Olivier

Olivier.fiquet@cea.fr





# Etude de l'impression bi-matériaux de CERMET par robocasting selon des diamètres de buses différents

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**

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. 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 à base  $UO_2$ . L'objectif technique recherché est une amélioration globale de la conductivité thermique de la céramique par incorporation d'une phase métallique. Les études procédés sont réalisées à partir de matériaux non radioactifs (Alumine) 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 optimiser. En particulier, on cherche à améliorer la configuration d'impression en travaillant avec des buses de diamètres différents entre la matrice céramique (corps de la pièce) et le motif métallique.

Pendant le stage, les thèmes suivants seront développés :

- Etude CAO en relation avec le design à réaliser et l'interprétation du trajet machine défini par le logiciel de découpe (slicer).
- Implémentation de la modification sur l'imprimante
- Réalisation d'impressions bi matériau selon différents designs
- Caractérisation des CERMET après frittage d'un point de vue microstructure.

Le stage se déroulera sur le site de Cadarache et mettra en œuvre uniquement des simulants non radioactifs..

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Logiciel CAO et Simplified 3D, cura

## ■ Mots clés :

Fabrication additive, CERMET

## ■ Possibilité de thèse :

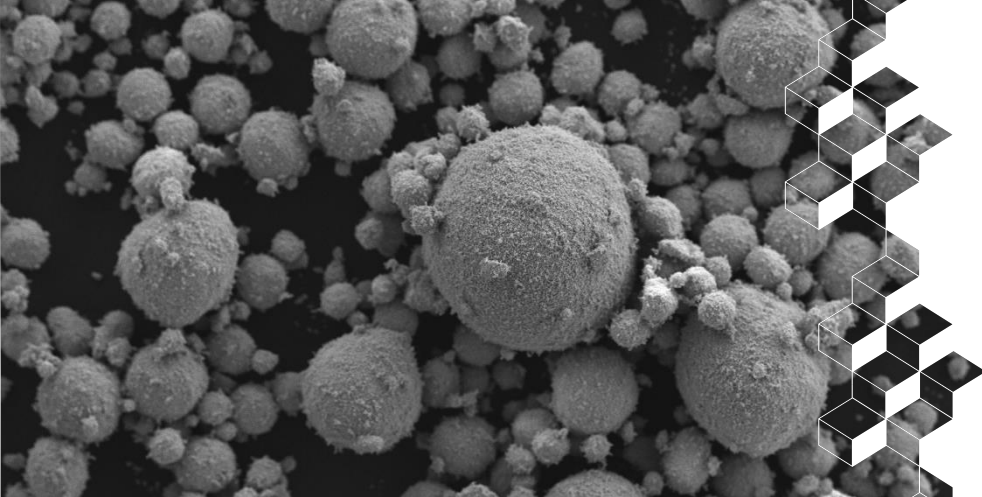
Oui au sein du service sur d'autres thématiques matériaux

## ■ Contact :

FIQUETolivier

Olivier.fiquet@cea.fr





## Mise au point d'un dispositif d'étude de la ségrégation de particules de poudre

DEC/SA3E/LCU

**Les poudres d'uranium sont utilisées dans l'industrie pour la fabrication du combustible à destination des centrales nucléaires civiles. Le transport de ces poudres lors de la production du combustible peut créer des phénomènes de ségrégation, néfaste pour ses propriétés finales. Le stage a pour but une meilleur compréhension de ces phénomènes.**

Le but du stage est de mettre au point un dispositif d'étude de ségrégation des poudres en utilisant un prototype déjà existant au laboratoire. Ce dispositif, et le protocole de mesure associé, devra permettre de quantifier l'aptitude d'une poudre à se ségréger sous l'action de vibrations (séparation des particules en fonction de leur taille, forme ou densité).

Après une première phase d'étude bibliographique sur la ségrégation des poudres soumises à des vibrations, le/la stagiaire devra mener des tests sur le prototype actuel avec des poudres modèles constituées de particules de différentes tailles et formes. Après analyses, ces expériences permettront au stagiaire d'améliorer le dispositif de vibrations et de mettre au point le protocole de mesure avant de l'utiliser sur des poudres d'uranium.

### Principales étapes:

- Recherche et analyse bibliographique : propriétés d'écoulement des poudres, mécanismes et caractérisation de la ségrégation, caractéristiques des poudres,
- Test sur des poudres modèles (billes de verre, sable, poudres

d'alumine etc...) du prototype existant,

- Tests de différentes méthodes de quantification de la ségrégation : échantillonnage avec pesées et mesures granulométriques, caméra rapide avec analyse d'images ou tout autre méthode issue de l'étude bibliographique,
- Amélioration du prototype existant ou conception d'un nouveau dispositif,
- Test du dispositif sur poudre d'uranium.

### Apport du sujet pour le candidat:

A l'issue de ce travail, le/la stagiaire disposera de compétences dans le domaine des milieux divisés notamment sur leurs caractéristiques physiques et leurs propriétés comportementales : écoulement et ségrégation. Ces compétences sont recherchées dans différentes applications industrielles et environnementales (pharmacie, agro-alimentaires, matériaux pour l'énergie, etc.).

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur. Parcours en Matériaux/Mécanique/Procédés

### ■ Durée du stage :

4-6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Granulométrie laser, MEB, microscopie optique, conception mécanique.

### ■ Mots clés :

Milieux granulaire, ségrégation, procédés, mécanique

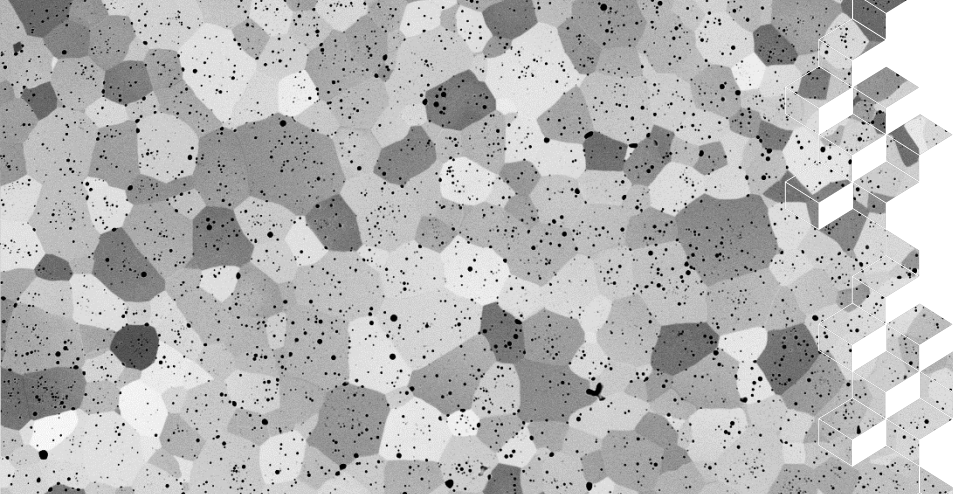
### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

BLANC Nicolas  
nicolas.blanc@cea.fr





# Fabrication de pastilles combustibles $\text{UO}_2$ : influence du dopage par un oxyde métallique

DEC/SA3E/LCU

Ce stage, au sein du Laboratoire des Combustibles Uranium, s'inscrit dans le cadre d'une étude visant à valider de certains dopants dans la conception de combustibles nucléaires innovants. Le cœur de ce travail s'articulera autour de la fabrication et de la caractérisation de pastilles d' $\text{UO}_2$  dopées par un oxyde métallique.

## Contexte :

Dans les réacteurs nucléaires, le combustible est composé de pastilles de dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) 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-clés 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 notamment pendant les situations transitoires.

L'ajout d'un oxyde métallique pourrait offrir une solution prometteuse dans les combustibles avancés. Ce stage se propose de contribuer à l'exploration de cette piste en fabriquant et en caractérisant de tels matériaux.

## Objectifs du stage :

### - Construction d'un modèle de solubilité

Le premier objectif du stage sera de vérifier la bonne dissolution de l'oxyde retenu dans le combustible. Cela se fera en contribuant expérimentalement à la construction de son modèle de solubilité dans l' $\text{UO}_2$ , en collaboration avec le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles.

### - Optimisation de la microstructure

Des recherches préliminaires montrent également que le dopage peut provoquer un grossissement des grains visibles dans la microstructure des pastilles d' $\text{UO}_2$ . Une telle microstructure pourrait améliorer la rétention des gaz de fission corrosifs produits dans le combustible lors des variations de puissance du réacteur. Le stage consistera à explorer et optimiser ce phénomène de croissance granulaire.

## 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.

- **Fabrication des échantillons** depuis le mélange et le broyage des poudres jusqu'au frittage des pastilles d' $\text{UO}_2$  dopées.

- **Caractérisation des matériaux** en utilisant les outils du laboratoire : Microscopie optique et électronique, analyse EDX ou EBSD, granulomètres...

- **Analyse et interprétation des résultats** obtenus en collaboration avec les modélisateurs, notamment à l'aide de calculs thermochimiques.

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

Ce stage vous permettra d'acquérir 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 à l'issue de ce travail d'utiliser différents outils de caractérisation d'une céramique allant de l'étude des propriétés d'une poudre jusqu'à l'analyse microstructurale de l'objet final.

Enfin, 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 matières nucléaires.

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

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

Microscopies optique et électronique / Python

## ■ Mots clés :

matériaux nucléaires, céramiques, physico-chimie, caractérisation

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

Moulin Julien

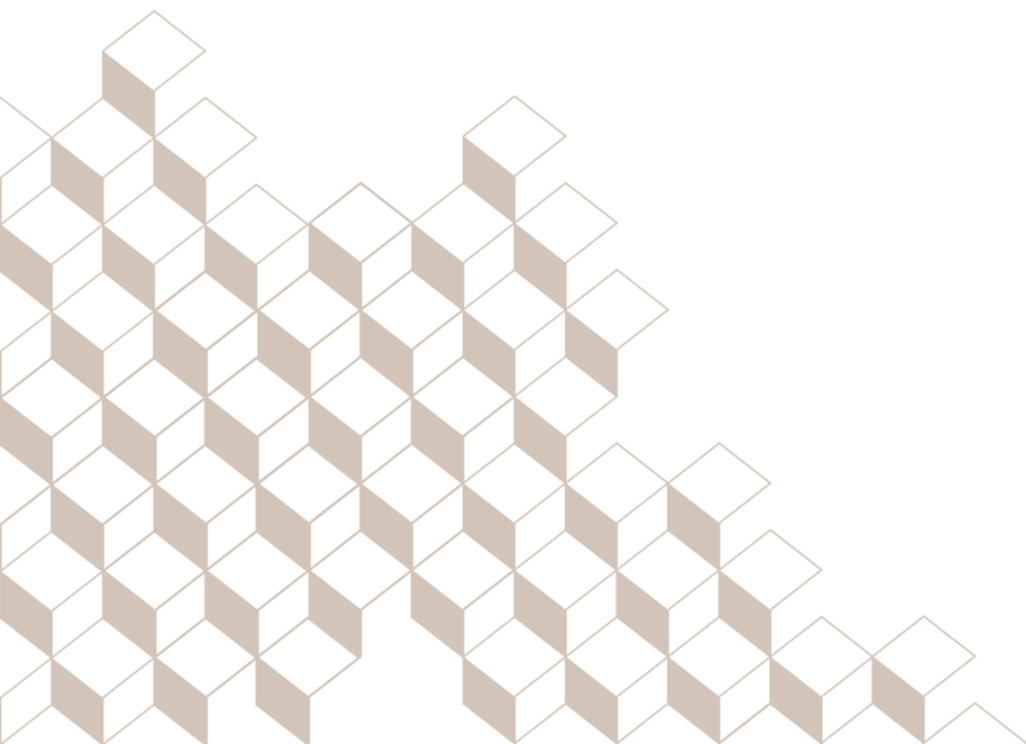
Julien.moulin@cea.fr



# S E S C

Service d'études et  
de simulation du  
comportement des  
combustibles

*Studies and Simulation of Fuel  
Behavior Unit*





# Prototypage de la simulation du pressage par une méthode sans maillage

DEC/SESC/LDOP

**Le procédé de fabrication des combustibles nucléaires est basé sur la métallurgie de poudres. Le pressage ou le pastillage est une étape qui consiste à transférer la poudre (sous forme de granules) dans des presses permettant d'obtenir des pastilles dites « pastilles crues ». Ce stage a pour objectif de mettre en place un prototype de simulation du pressage par une méthode de type MPM.**

## Contexte

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 finies (FEM) à l'échelle de la pastille et sur la méthode des 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 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 méthode permet de réduire les coûts de calculs 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 basée sur la méthode MPM et explorer sa capacité à et 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 ou 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

## ■ 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, SPH, MPM, DEM, C++, Python.

## ■ Mots clés :

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

## ■ Possibilité de thèse :

oui

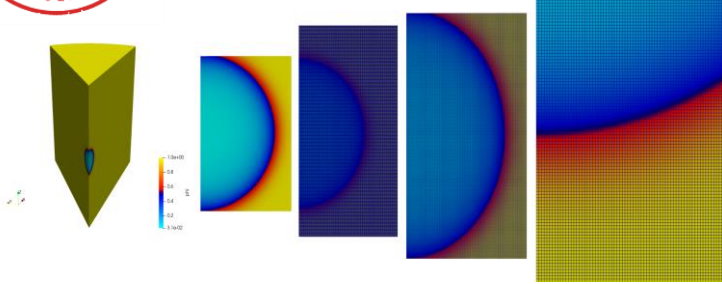
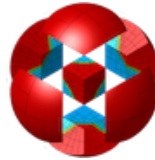
## ■ Contact :

vincent.topin@cea.fr

RICHEFEU Vincent

vincent.richefeu@univ-grenoble-alpes.fr

Lhassan.amarsid@cea.fr



Simulation 3D HPC de la propagation d'un front de fusion réalisé avec PLEIADES/SLOTH

## Raffinement local adaptatif pour un solveur champ de phase HPC pour la simulation du comportement des combustibles

DEC/SESC/LDOP

Les méthodes de champ de phase constituent un outil de modélisation flexible et performant pour décrire l'évolution en temps et en espace d'un système physique complexe soumis à de fortes hétérogénéités (transitions de phase, coalescence, fissuration, ...). Souvent utilisées en science des matériaux, elles sont mises œuvre dans les outils de calcul scientifique de la plateforme de simulation du comportement des combustibles PLEIADES, développée par le CEA en collaboration avec EDF et Framatome.

Les équipes du Département d'Études du Combustible (DEC) ont développé un solveur champ de phase nommé PLEIADES/SLOTH dédié à l'étude du comportement du combustible à différentes échelles de description, des conditions de fonctionnement nominal à des conditions extrêmes en température et composition des matériaux. À noter que PLEIADES/SLOTH s'appuie sur la librairie élément finis MFEM développée par le laboratoire Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

Actuellement, PLEIADES/SLOTH dispose d'une implémentation parallèle MPI de l'algorithme de résolution du problème non-linéaire commun à un ensemble d'applications d'intérêts telle que la propagation d'un front de fusion. Cette première implémentation a permis d'atteindre le milliard de degrés de liberté (DDL) en phase de test sur des simulations 3D d'intérêts pour nos applications combustibles.

L'ensemble de ses simulations est réalisé sur des maillages éléments finis conformes, avec une seule possibilité de raffinement uniforme du domaine. L'utilisation de méthodes de raffinement de maillages adaptatifs est envisagé dans PLEIADES/SLOTH pour améliorer davantage les temps de calcul en ne

raffinant finement qu'aux interfaces entre les matériaux.

L'objectif de ce stage est donc de proposer une implémentation massivement parallèle MPI du raffinement de maillage adaptatif dans PLEIADES/SLOTH.

Il s'agira d'utiliser des méthodes numériques proposées dans la librairie MFEM et de développer des critères de raffinement/dé-raffinement robuste et efficace pour chacune des physiques actuellement simulées par PLEIADES/SLOTH.

Pour cela, l'étudiant(e) bénéficiera d'un accès aux supercalculateurs du CEA et s'appuiera sur les compétences de l'unité d'accueil en termes de modélisation par champ de phase, en mathématiques appliquées et en développement de code massivement parallèle.

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.



### ■ Formation souhaitée :

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

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Raffinement local adaptatif (AMR), Eléments finis, Champ de phase, Calcul Haute Performance (HPC)

### ■ Mots clés :

AMR, PDE, Finite Element, Phase-field, MPI

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

Clément Introïni

[clement.introini@cea.fr](mailto:clement.introini@cea.fr)

Raphaël Prat

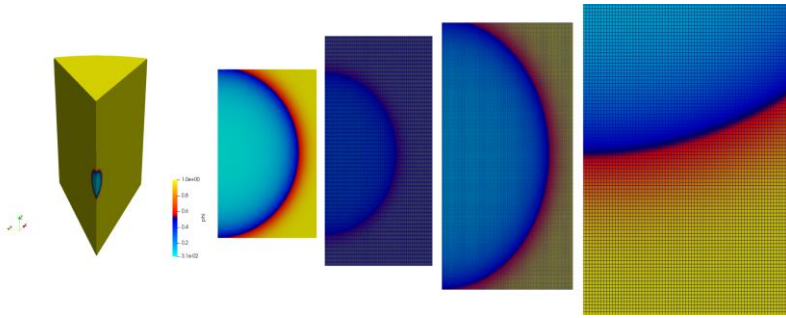
[raphael.prat@cea.fr](mailto:raphael.prat@cea.fr)

Isabelle Ramière

[isabelle.ramiere@cea.fr](mailto:isabelle.ramiere@cea.fr)

# Intégration des équations de Cahn-Hilliard dans un solveur champ de phase HPC pour la simulation du comportement des combustibles

DEC/SESC/LDOP



Simulation 3D HPC de la propagation d'un front de fusion réalisé avec PLEIADES/SLOTH

Les méthodes de champ de phase constituent un outil de modélisation flexible et performant pour décrire l'évolution en temps et en espace d'un système physique complexe soumis à de fortes hétérogénéités (transitions de phase, coalescence, fissuration, ...). Souvent utilisées en science des matériaux, elles sont mises œuvre dans les outils de calcul scientifique de la plateforme de simulation du comportement des combustibles PLEIADES, développée par le CEA en collaboration avec EDF et Framatome.

Les équipes du Département d'Études du Combustible (DEC) ont développé un solveur champ de phase nommé PLEIADES/SLOTH dédié à l'étude du comportement du combustible à différentes échelles de description, des conditions de fonctionnement nominal à des conditions extrêmes en température et composition des matériaux. À noter que PLEIADES/SLOTH s'appuie sur la librairie élément finis MFEM développé par le laboratoire Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

Actuellement, PLEIADES/SLOTH dispose d'une implémentation parallèle MPI de l'algorithme de résolution du problème non-linéaire commun à un ensemble d'applications d'intérêts telle que la propagation d'un front de fusion. Cette première implémentation a permis d'atteindre le milliard de degrés de liberté (DDL) en phase de test sur des simulations 3D d'intérêts pour nos applications combustibles.

La modélisation par champ de phase est basée sur deux grands types de modèles: Cahn-Hilliard et Allen-Cahn. PLEIADES/SLOTH dispose

déjà d'une implémentation du modèle d'Allen-Cahn avec la possibilité de réaliser des simulations couplées incluant changement de phase-diffusion thermique - diffusion d'espèces.

L'objectif de ce stage est d'étendre le champ d'application de PLEIADES/SLOTH en proposant une implémentation parallèle MPI des équations de Cahn-Hilliard. Plusieurs formulations sont envisagées pour résoudre ces équations non linéaires paraboliques d'ordre 4. L'implémentation proposée devra être rigoureusement vérifiée sur des cas tests disponibles dans la littérature.

Pour cela, l'étudiant(e) utilisera des des méthodes numériques proposées dans la librairie MFEM. Aussi, il(elle) bénéficiera d'un accès aux supercalculateurs du CEA et s'appuiera sur les compétences de l'unité d'accueil en termes de modélisation par champ de phase, en mathématiques appliquées et en développement de code massivement parallèle.

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.



## ■ Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées et/ou en sciences de matériaux

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Champ de phase, éléments finis, calcul haute performance

## ■ Mots clés :

Phase-field, Finite Element, Cahn-Hilliard,

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

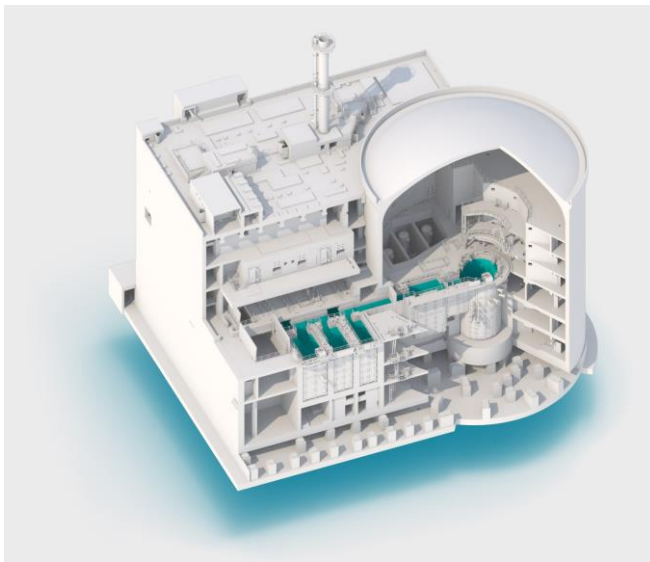
## ■ Contact :

Clément Introïni  
[clement.introini@cea.fr](mailto:clement.introini@cea.fr)

Isabelle Ramière  
[isabelle.ramiere@cea.fr](mailto:isabelle.ramiere@cea.fr)

Romain Le Tellier  
[romain.le-tellier@cea.fr](mailto:romain.le-tellier@cea.fr)





Maquette du réacteur expérimental RJH

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.

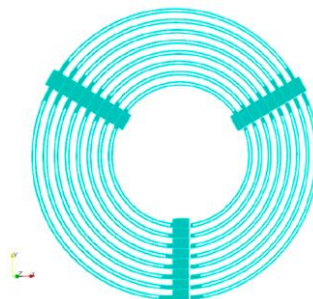
Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un projet de réacteur nucléaire de recherche porté par le CEA et construit sur le centre de Cadarache, consacré principalement à la recherche sur les matériaux et les combustibles pour l'industrie électronucléaire et la production de radio-isotopes pour la médecine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

La plateforme numérique « PLEIADES » <https://www.youtube.com/watch?v=VIKY2gp0FeQ> 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 permet de simuler des plaques de combustible ou un assemblage combustible complet en 3 dimensions.

L'un des enjeux pour le service d'étude et de simulation du comportement du combustible est de mieux reproduire numériquement le comportement en réacteur de la totalité d'un assemblage combustible type RJH. Une limitation

actuelle de l'application MAIA pour atteindre cet objectif provient du solveur éléments finis actuellement utilisé. Une solution est l'utilisation d'un solveur éléments finis adapté au Calcul Haute Performance (HPC).

L'objectif du stage est la mise en place d'une simulation thermomécanique d'un assemblage combustible complet d'un réacteur type RJH à l'aide du solveur éléments finis MANTA développé au CEA, sur les supercalculateurs du CEA. Une attention particulière sera portée sur les aspects décomposition de domaines et équilibrage de la charge de calcul entre les nœuds du supercalculateur.



Simulation thermomécanique 3D d'un assemblage combustible RJH

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

DEC/SESC/LDOP



■ **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, MANTA, MPI, OpenMP

■ **Mots clés :**  
Thermomécanique, éléments finis, HPC

■ **Possibilité de thèse :**  
Oui

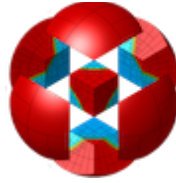
■ **Contact :**  
Fauque Jules  
[jules.fauque@cea.fr](mailto:jules.fauque@cea.fr)  
Prat Raphaël  
[raphael.prat@cea.fr](mailto:raphael.prat@cea.fr)



# Deep-Learning pour la simulation du comportement des combustibles par champ de phase couplé à la thermodynamique CALPHAD



## OpenCalphad



DEC/SESC/LDOP



Les méthodes de champ de phase constituent un outil de modélisation flexible et performant pour décrire l'évolution en temps et en espace d'un système physique complexe soumis à de fortes hétérogénéités (transitions de phase, coalescence, fissuration, ...). Souvent utilisées en science des matériaux, elles sont mises œuvre dans les outils de calcul scientifique de la plateforme de simulation du comportement des combustibles PLEIADES, développée par le CEA en collaboration avec EDF et Framatome.

Les équipes du Département d'Études du Combustible (DEC) ont développé un solveur champ de phase nommé PLEIADES/SLOTH dédié à l'étude du comportement du combustible à différentes échelles de description, des conditions de fonctionnement nominal à des conditions extrêmes en température et composition des matériaux. À noter que PLEIADES/SLOTH s'appuie sur la librairie élément finis MFEM développé par le laboratoire Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

Actuellement, PLEIADES/SLOTH dispose d'une implémentation parallèle MPI de l'algorithme de résolution du problème non-linéaire commun à un ensemble d'applications d'intérêts telle que la propagation d'un front de fusion. Cette première implémentation a permis d'atteindre le milliard de degrés de liberté (DDL) en phase de test sur des simulations 3D d'intérêts pour nos applications combustibles.

PLEIADES/SLOTH est également couplé à OpenCalphad qui est un code de calcul d'équilibre thermodynamique basé sur la minimisation de l'énergie de Gibbs. La modélisation par champ de phase couplée à la thermodynamique avec un appel direct à un minimiseur de Gibbs est d'autant plus coûteuse en temps de calcul que le système chimique est complexe, comme pour les simulations du comportement des combustibles nucléaires où les systèmes peuvent compter plus de 15 éléments avec une description thermodynamique associée

CALPHAD détaillée.

En complément d'une démarche de développement massivement parallèle, l'utilisation du Deep-Learning est dans certaines conditions une alternative pertinente pour mimer précisément et efficacement le comportement d'un minimiseur de Gibbs. Une première maquette a été développée avec succès sur un problème couplant OpenCalphad à la résolution d'un problème d'inter-diffusion dans système ternaire dans un solide.

Ce stage a pour but d'étendre cette maquette au cas d'un système ternaire dans un mélange diphasique liquide-solide. Le méta-modèle construit par Deep-Learning sur des applications d'intérêts devra être implémenté dans PLEIADES/SLOTH pour réaliser des simulations couplant champ de phase, thermodynamique CALPHAD et diffusion d'espèces. L'implémentation sera vérifiée rigoureusement par comparaison aux résultats des simulations réalisées avec un couplage direct à OpenCalphad.

Pour cela, l'étudiant(e) utilisera des des logiciels et des méthodes numériques proposées dans la plateforme PLEIADES, dans la librairie MFEM et dans PyTorch pour le Deep-Learning. Aussi, il(elle) s'appuiera sur les compétences de l'unité d'accueil en termes de modélisation par champ de phase, en mathématiques appliquées et en Deep-Learning.

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.

### ■ Formation souhaitée :

École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mathématiques appliquées et/ou en sciences de matériaux

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Deep-Learning, thermodynamique CALPHAD, champ de phase, PyTorch

### ■ Mots clés :

Deep-learning, phase field, thermodynamique, Calphad, IA

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

Clément Introïni  
[clement.introini@cea.fr](mailto:clement.introini@cea.fr)

Jérémie Bruyelle  
[jeremie.bruyelle@cea.fr](mailto:jeremie.bruyelle@cea.fr)

Romain Le Tellier  
[romain.le-tellier@cea.fr](mailto:romain.le-tellier@cea.fr)





Vue du réacteur RJH

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 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.

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 permet de simuler des plaques de combustible en 3 dimensions.

L'un des enjeux pour le service d'étude et de simulation du comportement des combustibles (SESC) est de reproduire numériquement le comportement en réacteur de la totalité d'un assemblage combustible type RJH.

La connaissance de la température externe à la paroi est une donnée très importante pour le calcul thermomécanique du combustible car celle-ci sert de valeur d'entrée du calcul thermique.

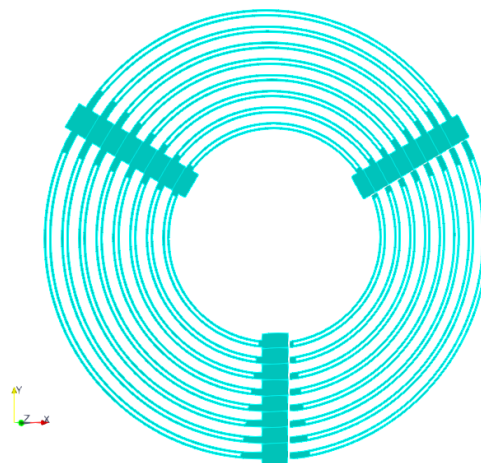
Actuellement le code MAIA dispose d'un modèle de thermohydraulique simplifié.

L'objectif du stage est la création d'un modèle de thermohydraulique multicanal pour un assemblage combustible complet d'un réacteur type RJH. Le modèle prendra en compte les principaux phénomènes physiques (pertes de charge, équilibrage des pressions, déformation des canaux hydrauliques, puissances...).

Dans un premier temps une analyse détaillée des phénomènes physiques permettra d'aboutir au système d'équations à résoudre.

Dans un deuxième temps, il s'agira de mettre en place un schéma numérique permettant la résolution du système.

Enfin, dans un troisième temps, ce schéma de calcul sera intégré à l'outil de calcul MAIA.

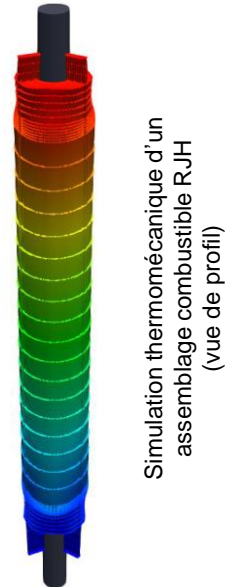


Simulation thermomécanique d'un assemblage combustible RJH (vue en coupe)



## Développement d'un modèle de thermohydraulique multicanal

DEC/SESC/LDOP



Simulation thermomécanique d'un assemblage combustible RJH (vue de profil)

■ Formation souhaitée :  
École ingénieur ou Master 2 spécialisé en mécanique des fluides/thermohydraulique

■ Durée du stage :  
4 à 6 mois

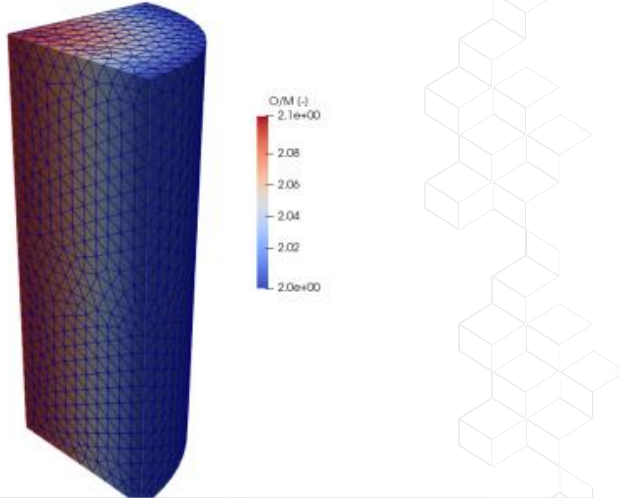
■ Méthode/logiciel(s):  
Plateforme PLEIADES, C++, Python, Scilab/Matlab

■ Mots clés :  
Thermohydraulique, Mécanique des fluides

■ Possibilité de thèse :  
Non

■ Contact :  
Marois Gentien  
[gentien.marois@cea.fr](mailto:gentien.marois@cea.fr)  
Chauvin Rémi  
[remi.chauvin@cea.fr](mailto:remi.chauvin@cea.fr)





# Modélisation multiphysique du frittage

DEC/SESC/LDOP

**Ce stage a pour but de mettre en place une modélisation thermique chimique mécanique du frittage afin de modéliser l'impact de la composition du gaz du four de frittage sur la densification du combustible.**

**Le travail de stagiaire se poursuivra par une thèse !**

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 le dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ), l'étape de frittage consiste en un traitement thermique sous pression partielle contrôlée de  $\text{O}_2$  permettant de consolider, densifier le matériau et faire grossir les grains de  $\text{UO}_2$ . Ainsi l'évolution de la taille de grain et la densification évoluent suivant les caractéristiques thermochimiques imposées par le four de frittage. La densification induit un retrait macroscopique de la pastille. 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 l'apparition de défauts (fissures et éclats).

Le but du stage est de mettre en place un modèle thermo-chemo-mécanique du frittage permettant de modéliser l'impact de la composition de l'atmosphère sur le retrait du combustible et de prendre en compte l'hétérogénéité de densité initiale issue du pressage sur la forme finale du combustible ainsi que sur les potentielles zones d'appariation de fissures.

Pour ce faire, le stagiaire commencera par prendre en main les simulations de densification sur le code de calcul Licos de la plateforme PLEIADES [3] qui sera utilisée durant l'ensemble du stage. Par la suite, le modèle de densification sera couplé au modèle thermomécanique afin d'étudier l'impact d'hétérogénéité initiale sur le champ

de contrainte final. La dernière partie du stage sera consacré au 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.

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 Développement des OCS combustibles PLEIADES (LDOP) et Le Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles (LM2C). 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 simulations numériques, la mécanique et les approches multiphysiques.

Suivant les qualités du stagiaire, il est envisagé une poursuite en thèse sur la même thématique !

## 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.

## ■ Formation souhaitée :

Ecole 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, diffusion, éléments finis

## ■ Possibilité de thèse :

oui

## ■ Contact :

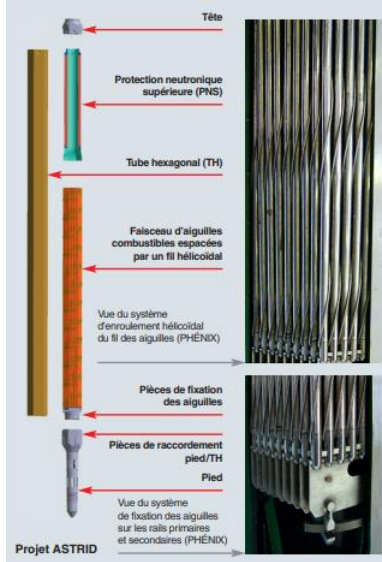
Socié Adrien

[adrien.socie@cea.fr](mailto:adrien.socie@cea.fr)

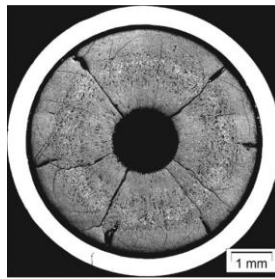
Léchelle Jacques

[jacques.lechelle@cea.fr](mailto:jacques.lechelle@cea.fr)





Assemblage combustible d'un RNR-Na  
M. Pelletier, La technologie des RNR-Na, CEA.



Coupe transversale d'une aiguille de combustible irradiée.  
M. Pelletier et Y. Guérin, *Comp. Nucl. Mater.*, vol. 2, 2020, pp. 75-105.

## Etude de l'impact de l'auto-irradiation sur les propriétés du combustible MOX $(U,Pu)O_{2-x}$

DEC/SESC/LECIM

**Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) constituent un des concepts de la 4<sup>ème</sup> génération de réacteurs nucléaires, et son combustible de référence est l'oxyde mixte  $(U,Pu)O_{2-x}$ . L'un des objectifs majeurs de ces réacteurs est la fermeture du cycle du combustible. Dans cette démarche, le CEA participe au développement d'un design innovant de RNR-Na.**

Le développement de ce réacteur innovant s'appuie sur la technologie RNR. Celui-ci se distingue par sa capacité de recyclage efficace des assemblages combustibles usés. En effet, l'objectif principal de la 4<sup>ème</sup> génération de réacteurs est la fermeture du cycle du combustible. Et plus particulièrement, de réduire drastiquement la production et le besoin en stockage des déchets radioactifs ultimes. Dans ce sens, l'un des objectifs est la revalorisation des assemblages non-irradiés, actuellement stockés en piscine depuis près de 40 ans. Les propriétés initiales (de fabrication) de ce combustible MOX (Mixed Oxide) disponible sont connues, cependant, une longue durée de stockage peut altérer ses propriétés.

En effet, l'auto-irradiation implique notamment la modification des propriétés structurales et microstructurales du matériau (ex: accumulation de défauts). De plus, ces caractéristiques sont intimement liées aux propriétés thermo-physiques du combustible, telles que la conductivité thermique par exemple. Plus particulièrement, celle-ci régit la marge à la fusion du combustible. Il est donc essentiel, suite à sa longue durée d'entreposage, d'évaluer les nouvelles propriétés de ce combustible MOX, ce qui permettra de le revaloriser.

Le travail de ce stage consiste donc à évaluer certaines propriétés du combustible stocké grâce à des outils de calcul disponibles au DEC/SESC.

Dans un premier temps, les calculs d'inventaire et de pression interne seront réalisés avec l'outil PRODHEL. Ce code permet de déterminer l'évolution du vecteur isotopique ainsi que le relâchement d'He, grâce aux données de fabrication (caractéristiques initiales) disponibles : le vecteur isotopique, le rapport O/Métal, le rapport Pu/Métal et la densité.

Dans un second temps, à partir des données de puissance thermique des assemblages, la température du combustible atteinte lors du stockage sera évaluée.

Enfin, des calculs thermodynamiques seront réalisés avec le logiciel Thermo-Calc et la TAFID, base de données thermodynamiques sur les matériaux nucléaires développée dans un cadre international, afin de déterminer l'évolution du rapport O/Métal du combustible. L'évaluation de cette propriété est essentielle, car elle permettra de quantifier la potentielle altération de la conductivité thermique du combustible, fortement dépendante de cette grandeur.

Les résultats des différents calculs effectués durant le stage permettront ainsi de proposer une évaluation des nouvelles propriétés du combustible stocké.

### ■ Formation souhaitée :

Matériaux, chimie des matériaux, thermodynamique

### ■ Durée du stage :

5-6 mois, à partir de mars 2025

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Thermo-Calc, OCS (Outils de Calcul Scientifique CEA)

### ■ Mots clés :

GEN IV, auto-irradiation, combustible nucléaire, thermodynamique

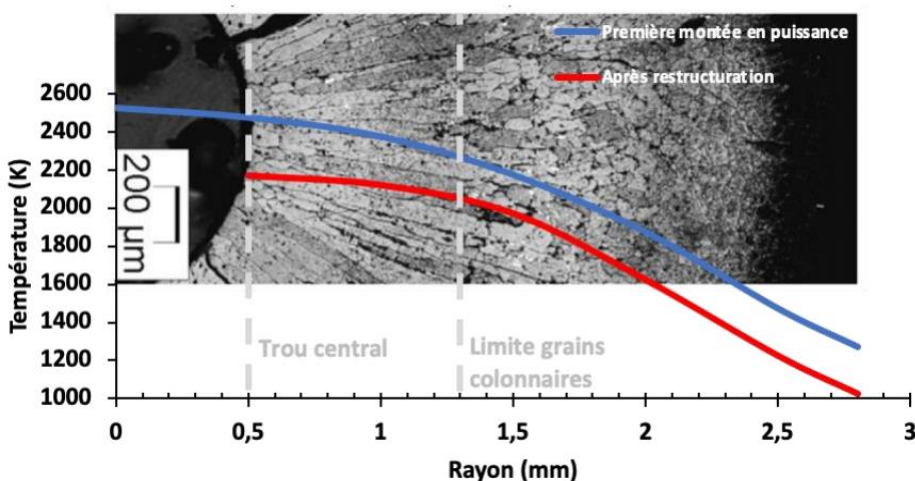
### ■ Possibilité de thèse :

NON

### ■ Contact :

DESAGULIER Marie-Margaux  
[marie-margaux.desagulier@cea.fr](mailto:marie-margaux.desagulier@cea.fr)  
DUMAS Jean-Christophe  
[jean-christophe.dumas@cea.fr](mailto:jean-christophe.dumas@cea.fr)





Gradient de température le long du rayon d'une pastille de combustible (U,Pu)O<sub>2-x</sub>  
M. Pelletier et Y. Guérin, Comp. Nucl. Mater., éd. 2, 2, 2020, pp.72-105

## Modélisation du transport de matière en phase gazeuse dans le combustible MOX (U,Pu)O<sub>2-x</sub>

DEC/SESC/LECIM & LEVA

**Ce sujet s'inscrit dans un contexte d'optimisation du code de calcul de performance du combustible GERMINAL. Et plus particulièrement sur la reproduction de la redistribution des éléments de l'oxyde mixte (U,Pu)O<sub>2-x</sub> sous irradiation. Ce sujet est donc axé sur la simulation des mécanismes de transport de matière tel que le transport en phases solide et gazeuse.**

Dans le cadre du développement des réacteurs nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération, la modélisation physico-chimique du comportement du combustible oxyde mixte en uranium et plutonium (U,Pu)O<sub>2-x</sub> sous irradiation est déployée.

Parmi les réacteurs nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération, les réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na) ont un régime thermique particulièrement élevé. En effet, sous irradiation, la température du combustible (U,Pu)O<sub>2-x</sub> peut s'élever jusqu'à près de 2500 K en son centre, induisant diverses phénomènes physico-chimiques tels que: une dilatation thermique différentielle, une migration radiale de l'O, une migration des porosités, la formation/l'élargissement du trou central et une redistribution radiale des actinides. C'est ce dernier point qui fait l'objet de ce sujet de stage.

En effet, la redistribution des éléments de l'oxyde le long du rayon de la pastille, dont les phénomènes physiques responsables sont le transport de matière en phase gazeuse et le flux diffusif en phase solide, engendre des variations radiales de composition du combustible et donc de son comportement thermique. De ce fait, une modélisation prédictive de la redistribution des actinides est un enjeu majeur pour la qualification du code de performance et vis-à-vis des études de sûreté nucléaire. Le CEA développe notamment le code de performance du combustible RNR-Na sous irradiation au sein de la plateforme PLEIADES: GERMINAL. La simulation développée actuellement est basée sur des modèles phénoménologiques.

Expérimentalement, des examens post-irradiation à l'échelle de la pastille ont permis de mettre en évidence la redistribution des actinides le long du rayon de la pastille. Des écarts entre

calculs et mesures ont été observés, notamment dans le cas des combustibles très sous stœchiométrique (Rapport O/Métal faible) ou lorsque la teneur en Pu (Pu/U+Pu) est élevée. La compréhension des mécanismes de transport de matière ainsi que la détermination des conditions thermiques d'activation de la redistribution sont donc essentielles.

L'objectif de ce stage consiste à réaliser une étude approfondie sur la simulation des mécanismes de transport de matière en phases solide et gazeuse dans le cas des oxydes mixtes (U,Pu)O<sub>2-x</sub>. Et plus particulièrement, sur la cohérence du couplage des deux modèles mais également sur les coefficients d'inter-diffusion équivalents associés.

Dans un premier temps, une étude bibliographique sera réalisée afin d'identifier les paramètres du modèle de diffusion en phase gaz notamment. Ensuite, des critères seront définis afin d'évaluer la pertinence de la modélisation pour les différentes configurations testées. Le couplage de deux mécanismes de transport sera testé et les résultats de la modélisation seront comparés aux données expérimentales relatives à plusieurs expériences.

L'enjeu de ce stage est d'améliorer la compréhension et la modélisation des mécanismes de transport prépondérants dans le combustible, sous irradiation, ce qui permettra une meilleure prédiction de la redistribution des actinides par l'OCS GERMINAL.

### ■ Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur (Sciences des matériaux, Chimie des matériaux), physique, numérique.

### ■ Durée du stage :

5 ou 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

OCS GERMINAL

### ■ Mots clés :

Combustible nucléaire, simulations, transport de matière.

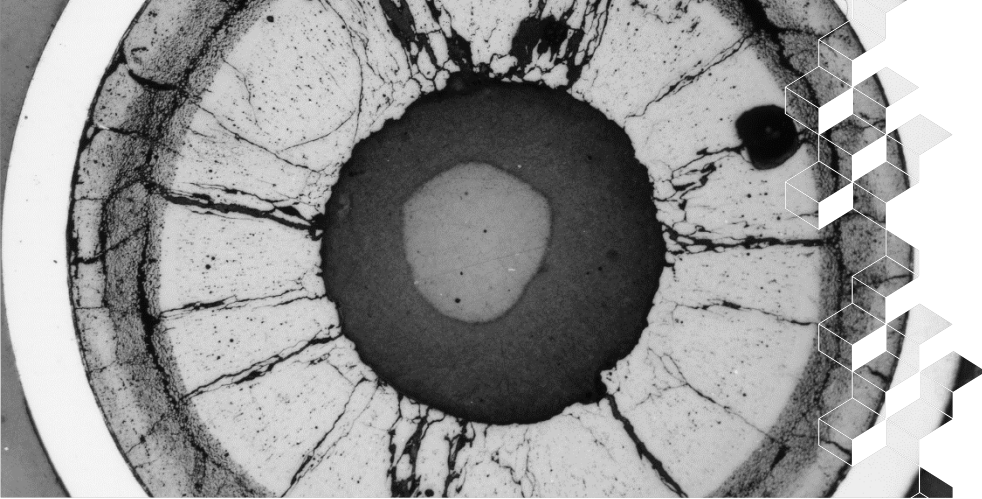
### ■ Possibilité de thèse :

NON

### ■ Contact :

DESAGULIER Marie-Margaux (LECIM)  
[marie-margaux.desagulier@cea.fr](mailto:marie-margaux.desagulier@cea.fr)  
Isabelle VIALARD (LEVA)  
[Isabelle.viallard@cea.fr](mailto:Isabelle.viallard@cea.fr)





# Optimisation de conditions d'essais expérimentaux sur des combustibles de 4<sup>ème</sup> génération

DEC/SESC/LECIM

## Contexte :

Dans le cadre des futurs réacteurs nucléaires, dits de 4<sup>ème</sup> génération, le CEA est impliqué dans le développement de petits réacteurs modulaires à neutrons rapides et refroidis au sodium, les AMR.

Le stage se déroulera au Laboratoire de Conception et d'Irradiations Multifilières dont le rôle est de concevoir et dimensionner les combustibles des réacteurs futurs (AMR et autres). Cela implique la définition d'irradiations expérimentales qui servent à démontrer le bon comportement du combustible en toute situation. Pour ce faire, les équipes du laboratoire utilisent des outils de simulation développés dans la plateforme PLEIADES [1], et sont en interaction directe avec les équipes des réacteurs expérimentaux (par ex. le réacteur CABRI ou le futur RJH à Cadarache) qui, elles, conçoivent les dispositifs d'essai et définissent ainsi les conditions d'irradiation.

## Objectifs :

Des éléments combustibles pré-irradiés ont été sélectionnés pour effectuer de futurs essais transitoires dans le réacteurs d'essai TREAT aux USA [3]. On s'intéressera dans ce stage à définir les conditions d'irradiation de ces futurs essais. Les conditions devront permettre d'analyser les différents mécanismes pouvant intervenir en situation incidentelles (gonflement, fusion du combustible, rupture de gaine, etc.).

Pour cela l'outil GERMINAL [2] de la plateforme PLEIADES sera utilisé.

## Étapes du stage :

Les étapes du stage seront les suivantes :

- Prise en main de l'outil GERMINAL
- Simulation de l'irradiation de l'élément combustible pendant la phase nominale avant le transitoire
- analyse de l'état du combustible après cette première phase.
- Définition des conditions enveloppes du futur essai (vitesse de rampe de puissance, température, ...)
- Réalisation d'études paramétriques de ces transitoire de puissance avec GERMINAL (possibilité d'utiliser la plateforme statistique URANIE)
- Post-traitement des résultats de calcul et interprétation.
- Proposition de plusieurs conditions d'essai optimisées vis-à-vis des phénomènes à caractériser.

## Relations/collaboration :

Collaboration avec l'équipe de développement des outils PLEIADES, l'équipe en charge des essais TREAT, et l'équipe de développement de la plateforme URANIE.

[1]<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110577>

[2]<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.12.030>

[3]<https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1650605>

[4]<https://doi.org/10.1051/epjn/2018050>

Ingénieur / Master 2 généraliste  
Bonnes compétences en :  
■ **Formation souhaitée :**  
thermomécanique, science des matériaux, simulation numérique  
Anglais courant

## ■ **Durée du stage :**

6 mois

■ **Méthode/logiciel(s) :**  
Linux, Python, GERMINAL, URANIE

■ **Mots-clés :**  
Combustible nucléaire, 4<sup>ème</sup> Génération, Thermo-mécanique, simulation, optimisation

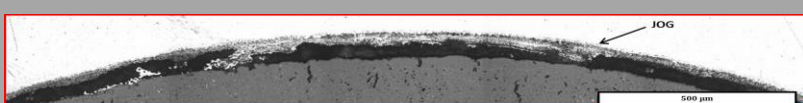
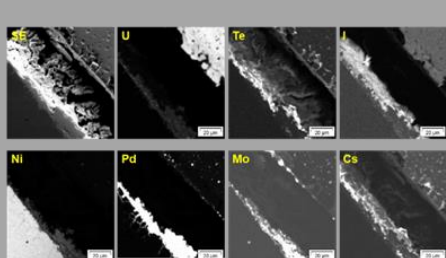
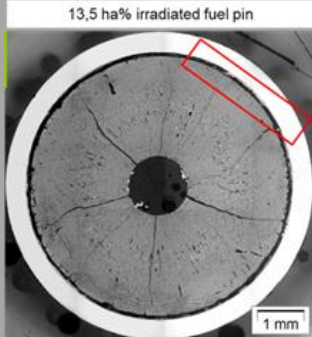
## ■ **Possibilité de thèse :**

Oui

■ **Contact :**  
BLANC Victor  
[victor.blanc@cea.fr](mailto:victor.blanc@cea.fr)

DUMAS Jean-Christophe  
[jean-christophe.dumas@cea.fr](mailto:jean-christophe.dumas@cea.fr)





# Calcul de la composition chimique de l'interface pastille-gaine du combustible de réacteurs à neutrons rapides irradié à fort taux de combustion

DEC/SEC/LECIM

Les combustibles des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium se caractérisent par des températures très élevées de fonctionnement. Dans ces conditions, le comportement global du combustible est significativement impacté par la présence de produits de fission volatils relâchés de la pastille dans le jeu pastille-gaine, qui peuvent se condenser sous différentes formes chimiques entre la pastille combustible d'oxyde d'uranium et de plutonium et la gaine en acier. On assiste en particulier à deux phénomènes spécifiques à ce type de combustible ayant lieu à moyen et fort taux de combustion qui sont :

- La formation d'une couche de composés de produits de fission entre la surface externe de la pastille et la face interne de la gaine à taux de combustion moyen, dénommée JOG pour *Joint Oxyde Gaine*,
- La formation d'une couche de produits de corrosion, composée de produits de fission et des éléments constitutifs de l'acier de gainage, sur la face interne de la gaine à fort taux de combustion : la ROG (*Réaction Oxyde-Gaine*).

Ces phases chimiques peuvent modifier le transfert thermique, ce qui a un impact sur le comportement de l'aiguille combustible au cours de l'irradiation et peut être un facteur limitant pour l'augmentation des taux de combustion. Afin de réaliser des études et expertises, le CEA développe des Outils de Calcul Scientifique (OCS) ([youtu.be/VIKY2gp0FeQ](https://youtu.be/VIKY2gp0FeQ)) du comportement thermomécanique et physico-chimique des aiguilles nucléaires et travaille sur l'amélioration continue de leurs modélisations.

Aussi, il est important de pouvoir estimer de manière relativement précise la composition chimique de la pastille combustible et de l'interface pastille-gaine au cours de l'irradiation.

## Objectifs :

L'objectif du stage consiste à évaluer les phases chimiques du JOG et de la ROG du combustible  $(U,Pu)O_2$  irradié par le biais de calculs thermodynamiques du système chimique multi-phasé complexe constitué d'actinides, de produits de fission et d'oxygène, sur la base d'analyses quantitatives récentes d'inventaire en éléments chimiques présents à l'interface pastille-gaine en fin d'irradiation obtenus par cartographie X et analyse microsonde réalisées dans le cadre d'une thèse en cours.

## Étapes du stage :

Dans un premier temps, le stagiaire devra s'appropriier les notions de base relatives à la modélisation thermodynamique et au comportement général du combustible sous irradiation via un travail bibliographique.

Ensuite, il effectuera des calculs de composition chimique du combustible oxyde mixte irradié pour des expériences d'irradiation à l'aide de calculs effectués avec le logiciel de calcul thermodynamique OpenCalphad ou Thermo-Calc ainsi que de la TAFID, base de données thermodynamiques sur les matériaux nucléaires développée dans un cadre international à l'OCDE/AEN.

Enfin, les résultats seront comparés aux calculs obtenus à partir d'inventaires en éléments chimiques obtenus avec l'OCS GERMINAL sur des pastilles combustibles fortement irradiées.

## Relations/collaboration :

Collaboration avec des expérimentateurs du centre CEA de Cadarache et avec une équipe du centre CEA de Saclay spécialisée dans la modélisation thermodynamique.

## ■ Formation souhaitée :

Ingénieur / Master 2 généraliste disposant de compétences en sciences des matériaux, chimie-Physique et génie nucléaire

## ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Logiciels OpenCalphad / Thermo-Calc, Python

## ■ Mots clés :

Combustible nucléaire, Thermochimie, JOG, ROG, Réacteurs à Neutrons Rapides

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

DUMAS Jean-Christophe  
[jean-christophe.dumas@cea.fr](mailto:jean-christophe.dumas@cea.fr)





## Dimensionnement thermomécanique par éléments finis des éléments absorbants d'un réacteur MSR

DEC/SESC/LECIM

Dans le cadre des futurs réacteurs nucléaires, dits de 4<sup>ème</sup> génération, le CEA a en charge avec ses partenaires la conception d'un réacteur à sel fondu (MSR) à neutrons rapides dont l'objectif principal est la transmutation des actinides mineurs afin de réduire la quantité de déchets radioactifs.

### Contexte :

A ce jour, la voie privilégiée en France pour la gestion des matières et déchets radioactifs repose d'une part sur le stockage géologique profond et d'autre part sur la transmutation des actinides mineurs. L'américium a été identifié comme la première cible d'une stratégie possible de séparation-transmutation dont l'enjeu serait de réduire la nocivité à long terme des déchets ultimes. Dans ce contexte, le projet ISAC (Innovative System for Actinides Conversion) alliant les différents acteurs de la filière nucléaire française (CEA, CNRS, EDF, FRAMATOME, ORANO) a souhaité répondre à l'attente sur la gestion des déchets nucléaires à vie longue et propose une alternative en rupture basée sur la transmutation en réacteur à sel fondu (MSR). ISAC vise à étudier la faisabilité du MSR « convertisseur d'actinides » via la réalisation d'une étude d'esquisse (évaluation des options de conception, performance du concept, analyse de fonctionnement et de sûreté). L'objet retenu est un MSR à spectre rapide à sel chlorure avec inventaire et alimentation en actinides mineurs et est dénommé ARAMIS-A pour "Advanced Reactor for Actinides Management In Salt with Americium".

### Objectifs :

Au sein du projet ISAC, le laboratoire LECIM a en charge la conception et le prédimensionnement des systèmes de pilotage et de contrôle de la réactivité (absorbants neutroniques). Une première phase de prédimensionnement analytique de ces systèmes associée à une conception préliminaire a déjà été menée.

L'objectif principal du stage est de poursuivre le travail de conception et de dimensionnement de ces systèmes via la mise en place de simulations par éléments finis. Pour cela, l'outil LICOS de la plateforme PLEIADES [[youtu.be/VIKY2gp0FeQ](https://youtu.be/VIKY2gp0FeQ)] sera utilisé et le dimensionnement thermomécanique sera réalisé en utilisant la méthodologie RAMSES II (Règles d'Analyse Mécaniques des Structures irradiées).

### Étapes du stage :

- Prise en main de l'outil LICOS et modélisation des systèmes de pilotage et de contrôle de la réactivité d'ARAMIS-A
- Calculs LICOS et études de sensibilité à certains paramètres de conception
- En fonction des résultats obtenus, des optimisations de conception pourront être proposées
- Rédaction d'un rapport technique

### ■ Formation souhaitée :

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

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Outil LICOS de la plateforme PLEIADES

### ■ Mots clés :

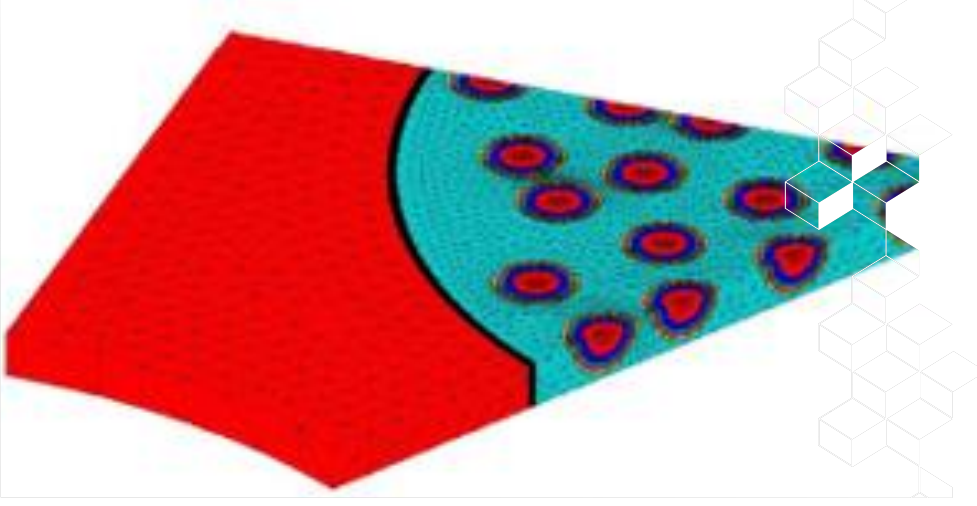
Éléments finis – Conception – MSR – Absorbants

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

DUPONT Vincent  
[vincent.dupont@cea.fr](mailto:vincent.dupont@cea.fr)



# Étude du comportement thermomécanique d'un combustible de type HTR, réalisation d'un benchmark et étude paramétrique sur le matériau combustible

DEC/SESC/LECIM

Dans divers pays dans le monde, la technologie des réacteurs HTGR (High Temperature Gas cooled Reactor – Réacteur à Haute Température refroidi au gaz) fait l'objet d'un intérêt croissant dans une perspective de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour la production de chaleur industrielle à haute température et la décarbonation de l'industrie.

Plusieurs projets de réacteurs de type modulaire (SMR-AMR) ou microréacteurs (MMR) sont en cours de développement et visent à répondre à divers besoins industriels en chaleur à haute température comprise entre 250 et 750 °C. Il s'agit principalement de besoins pour la production d'hydrogène liée à des procédés nécessitant de disposer de chaleur à des températures élevées autour de 700°C, la production de produits chimiques et carburants de synthèse, de production de produits minéraux (ciment, verres).

Le CEA a développé le code de calcul ATLAS de la plateforme PLEIADES pour décrire finement le comportement thermomécanique du combustible des réacteurs HTGR (particules TRISO + compacts).

## Objectifs :

L'objectif du stage est d'effectuer des calculs thermomécaniques avec le code ATLAS V3 et comparer ses performances par rapport aux résultats obtenus dans le cadre d'un benchmark international, le CRP-6. Ce benchmark a été réalisé avec plusieurs codes internationaux dédiés à l'étude du comportement thermomécanique des combustibles HTR, dont la version 2 d'ATLAS.

Le stage consistera aussi à faire évoluer le matériau combustible via de nouvelles lois implémentées dans le code et de déterminer l'impact de l'évolution des matériaux sur les performances thermomécaniques du combustible.

## Étapes du stage :

### Phase 1 :

Appropriation de l'outil ATLAS à partir de cas tests existants (irradiations HTR réalisées par le CEA)

### Phase 2 :

Réalisation de calculs thermomécaniques avec le code ATLAS V3 et comparaison avec les résultats du benchmark CRP6. Il y a la possibilité de publier les résultats qui seront obtenus.

### Phase 3 :

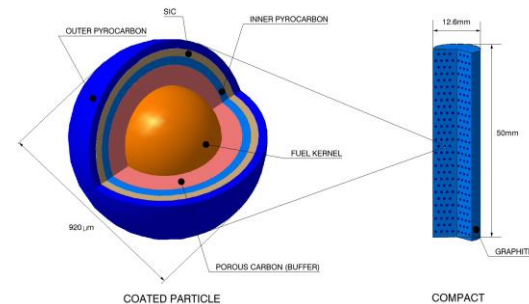
Evolution du combustible et étude avec l'outil ATLAS de l'impact de ce changement sur les performances thermomécaniques du combustible.

### Phase 4 :

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

## Relations/collaboration :

Collaboration au sein du département d'étude des combustibles et avec des partenaires industriels



## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Outil ATLAS de la plateforme PLEIADES

## ■ Mots clés :

HTR – AMR – Réacteur calogène – TRISO

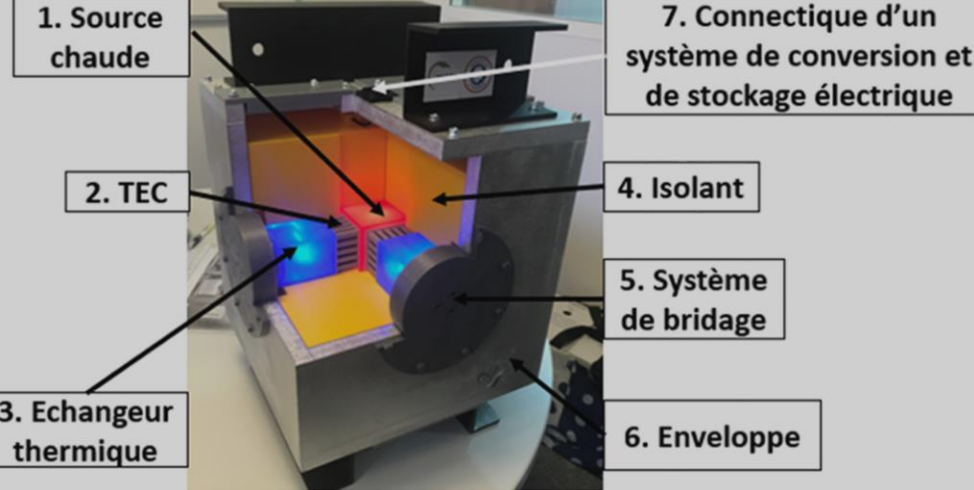
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

LAMBERT Thierry  
TURQUAIS Benjamin  
[thierry.lambert@cea.fr](mailto:thierry.lambert@cea.fr)  
[benjamin.turquais@cea.fr](mailto:benjamin.turquais@cea.fr)





## Etudes thermomécaniques en support au développement de batteries nucléaires

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 aux services de projets d'innovation très divers. Parmi ceux-ci figurent, depuis peu, d'ambitieux développements de batteries nucléaires autonomes, pour des applications spatiales ou l'alimentation thermique / électrique de systèmes isolés.

Dans ce contexte, le CEA s'est vu confié la responsabilité de concevoir et dimensionner des sources de chaleurs encapsulées, telles que celles qui équipent les projets spatiaux depuis plusieurs années, et sur lesquels l'Europe (cf. <https://world-nuclear-news.org/Articles/PULSAR-project-to-research-nuclear-technology-for>) et des industriels français (cf. [https://m.youtube.com/watch?v=18ZDyoy2awk&ab\\_channel=D%C3%A9chetsRadioactifs](https://m.youtube.com/watch?v=18ZDyoy2awk&ab_channel=D%C3%A9chetsRadioactifs)) se positionnent de manière volontariste pour acquérir une autonomie vis-à-vis des fournisseurs historiques Américains et Russes.

Le CEA/DEs/IRESNE/DEC/SESC/LECIM, en charge de missions d'innovation sur les combustibles nucléaires, est impliqué sur plusieurs projets pour lesquels il réalise l'étude thermomécanique de modules constitutifs de ces batteries nucléaires. Dans la continuité de travaux engagés sur le sujet depuis 2 ans, le travail de stage consisterait à réaliser une étude thermomécanique du bloc source de la batterie nucléaire du projet GAIA (essentiellement conçue et pré-dimensionnée en amont), afin d'identifier les sources d'incertitudes principales et de proposer des pistes d'optimisation visant à en fiabiliser le design, et potentiellement à dégager des marges de dimensionnement.

Le/la stagiaire doit avoir une expérience des calculs aux éléments finis (et, si possible, de l'outil Cast3m) et de leur application à des problèmes de thermique et de mécanique (et, si possible, de thermomécanique). Une familiarité avec les méthodes et outils de traitement des incertitudes (analyse de sensibilité, notamment) serait un plus appréciable.

### ■ Formation souhaitée :

Bac + 5 : Elève ingénieur ou étudiant de master 2

Cursus comportant un solide volet de thermique / mécanique

### ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Calculs aux éléments finis, avec un logiciel basé sur Cast3m

### ■ Mots clés :

Thermomécanique, batteries nucléaires

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

ZABIEGO Maxime

Maxime.zabiego@cea.fr





# Conception / dimensionnement thermomécaniques en support au développement d'un système de dépressurisation optimisé

DEC/SESC/LECIM

Le CEA valorise son expérience dans le domaine des combustibles nucléaires et des matériaux structuraux en mettant ses compétences aux services de projets d'innovation très divers. Parmi ceux-ci figure un projet dont l'objectif est de concevoir & dimensionner un système de dépressurisation contrôlée d'un dispositif sous pression, avec diverses fonctionnalités complémentaires.

Le CEA/DES/IRESNE/DEC/SESC/LECIM, en charge de missions d'innovation sur les **combustibles nucléaires**, est impliqué sur plusieurs projets pour lesquels il réalise des études de **conception / dimensionnement thermomécanique** de systèmes fonctionnant sous irradiation.

Pour l'un de ces projets, l'objectif est de **concevoir & dimensionner un système de dépressurisation contrôlée d'un dispositif sous pression**, avec diverses fonctionnalités complémentaires, dont la mise en œuvre nécessite une **optimisation potentiellement complexe**. Diverses **solutions techniques** ont été proposées sur la base d'une analyse de conception. Il s'agit d'évaluer leur **viabilité**, leurs **performances** et leur **robustesse**, au travers d'**études de pré-dimensionnement**, qui devront notamment prendre en compte les sources d'**incertitudes** affectant le déclenchement du système de dépressurisation, ainsi que son comportement post-dépressurisation.

La première étape du travail à réaliser, consiste à identifier les **critères de dimensionnement**, en fonction des **caractéristiques du système** proposé, qui est susceptible de comporter des **fonctionnalités secondaires** dont il s'agira de déterminer s'il est pertinent de les prendre en compte au regard des **risques** qu'elles font éventuellement peser sur la mise en œuvre des **fonctionnalités principales**.

La seconde étape consiste à réaliser un **pré-dimensionnement thermomécanique** de diverses solutions considérées, au moyen de calculs analytiques et/ou de calculs aux **éléments finis** (a priori basés sur Cast3m). Ces calculs seront par ailleurs couplés à des études de **traitement des incertitudes** (a priori basées sur la plateforme Uranie).

Le/la stagiaire doit avoir une formation en **conception / dimensionnement thermique & mécanique**, ainsi qu'une familiarité avec les **calculs aux éléments finis** et, si possible de leur application à des problèmes de **thermomécanique**. Une connaissance des méthodes de **traitement des incertitudes** (analyse de sensibilité, propagation d'incertitudes, optimisation...) serait un plus appréciable.

## ■ Formation souhaitée :

Bac + 4/5 : Elève ingénieur ou étudiant de master

Cursus comportant un solide volet de thermique / mécanique / matériaux

## ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Calculs aux éléments finis : Cast3m, & traitement des incertitudes : Uranie

## ■ Mots clés :

Conception / dimensionnement, thermomécanique, incertitudes

## ■ Possibilité de thèse :

A priori, non

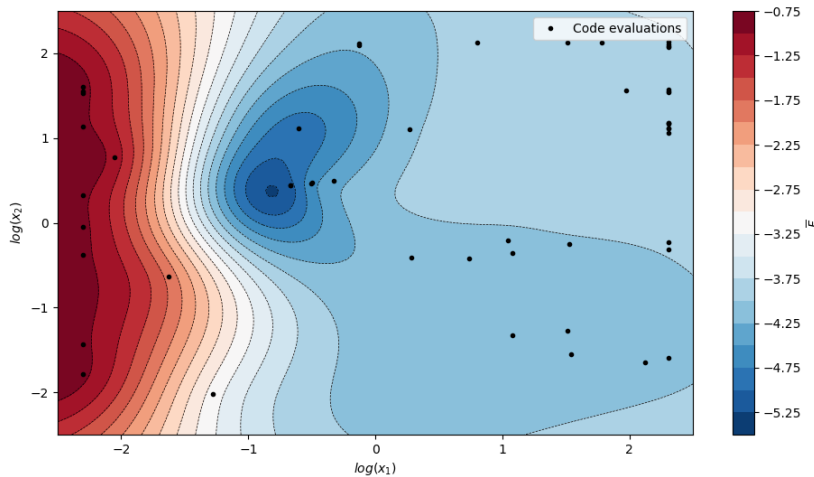
## ■ Contact :

ZABIEGO Maxime  
maxime.zabiego@cea.fr



# Méthodes de calibration des modèles physiques pour la simulation des combustibles nucléaires

DEC/SESC/LEVA



**Ce stage s'inscrit dans la validation des codes de simulation développés au CEA afin de simuler le comportement des combustibles nucléaires.**

Afin de réaliser des études et expertises, le CEA développe des outils de simulation du comportement des combustibles nucléaires à différentes échelles, dans différentes situations de fonctionnement et pour différentes filières de réacteurs. Ces outils de calcul multi-physiques couplent des modèles traitant des évolutions thermomécaniques, neutroniques et physico-chimiques du matériau combustible et de sa gaine. Ces différents modèles physiques disposent de paramètres non-mesurables qui sont ajustés pour calculer aussi précisément que possible un ensemble d'expériences. La détermination d'un optimum paramétrique pour un modèle est un problème complexe, considérant que les mesures expérimentales et les autres modèles couplés sont entachés d'incertitudes, que les observables sont multiples, et que l'exécution du code peut être très couteuse en temps de calcul.

L'objectif du stage est d'évaluer différentes méthodes d'ajustement paramétrique basées sur la plateforme logicielle URANIE [uranie.cea.fr].

. On considérera deux modèles physiques d'intérêt qui présentent des problèmes variés de calibration. On s'intéressera notamment à un modèle prédisant le déplacement radial des fragments de pastille

combustible ainsi qu'à un modèle d'oxydation de la gaine. Pour chaque modèle étudié, le stage aura pour but :

- de comprendre les mesures utilisées pour la calibration et leurs incertitudes, ainsi que les principales incertitudes de modélisation,
- de choisir une stratégie pertinente afin de réduire la dimension du problème d'optimisation (études de sensibilité...) ou le coût de calcul (méthodes multi-fidélité, métamodèle...),
- de mettre en place les outils numériques nécessaires afin de mettre en œuvre différentes méthodes de calibration adaptées au problème (multi-objectifs, avec prise en compte des incertitudes, couplée à la construction d'un métamodèle, etc.),
- de comparer les optima paramétriques déterminés par ces différentes approches afin de recommander de nouvelles valeurs à utiliser dans les codes.

## ■ Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieurs, avec connaissances en statistiques. Un goût pour la science des matériaux et/ou la simulation numérique sont préférables.

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, URANIE

## ■ Mots clés :

Optimisation, incertitudes, simulation

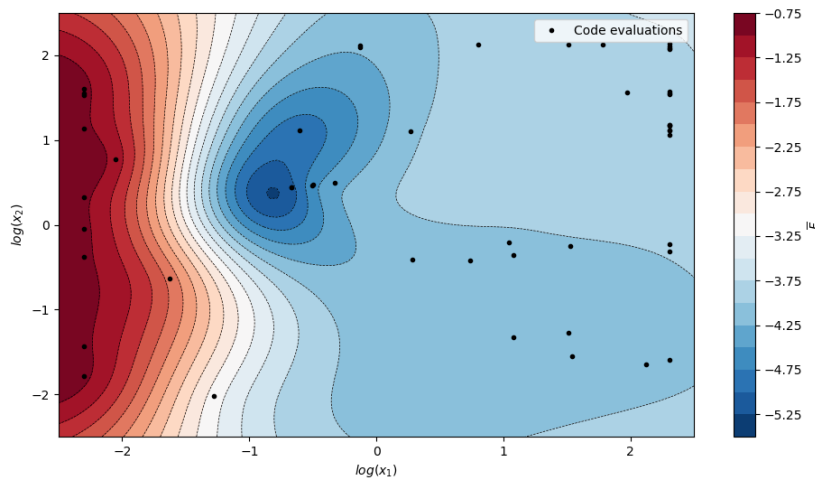
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

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





# Calibration methods for physical models in nuclear fuel simulation

DEC/SESC/LEVA

This internship deals with the validation of computer codes developed at CEA to simulate the behavior of nuclear fuels.

In order to conduct studies and assessments, CEA develops simulation tools of the behavior of nuclear fuels at different scales, in various operating situations, and for different reactor types. These multi-physics codes couple models that handle thermomechanical, neutronic, and physicochemical evolutions of the fuel material and its cladding. These different physical models have non-measurable parameters that are adjusted to reproduce a set of experiments as precisely as possible. Determining an optimal set of parameters for a model is a complex problem, considering that experimental measurements and other coupled models have uncertainties, there is multiple observables, and code execution is costly.

The objective of the internship is to evaluate different parameter calibration methods based on the URANIE software platform [uranie.cea.fr]. Two physical models of interest that present varied calibration problems will be considered. Particular attention will be given to a model predicting the radial displacement of fuel pellet fragments and a model of cladding oxidation. For each model studied, the internship aims to:

- Understand the measurements used for calibration and their

uncertainties, as well as the main modeling uncertainties,

- Choose a relevant strategy to reduce the dimension of the optimization problem (sensitivity studies, etc.) or the computational cost (multi-fidelity methods, metamodels, etc.),

- Implement the necessary digital tools to apply different calibration methods suited to the problem (multi-objective, accounting for uncertainties, coupled with the construction of a metamodel, etc.),

- Compare the optimal parameter sets determined by these different approaches to recommend new values to be used in the codes.

## ■ Formation souhaitée :

Master's degree or engineering school, with knowledge in statistics. An interest in materials science and/or numerical simulation is preferable.

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, URANIE

## ■ Mots clés :

Optimisation, uncertainties, numerical simulation

## ■ Possibilité de thèse :

No

## ■ Contact :

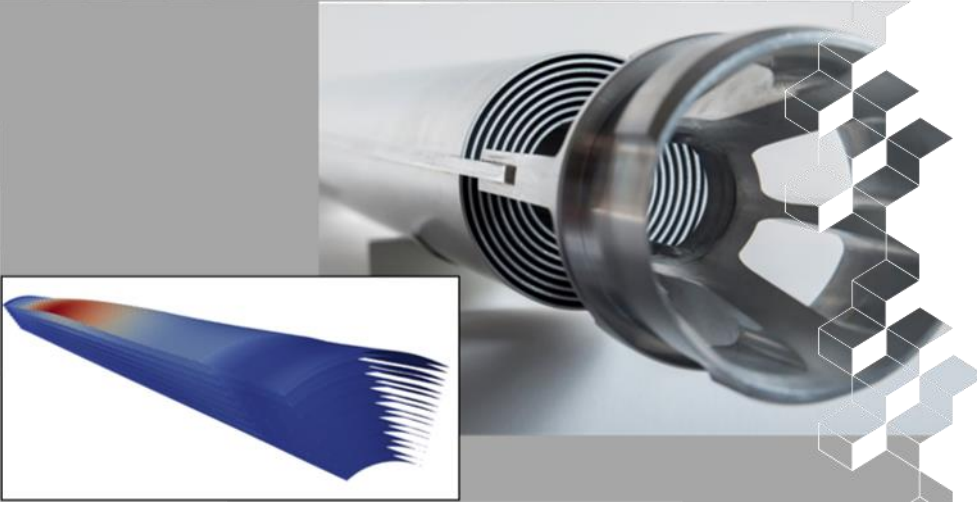
BERNACHY-BARBE Fabien  
fabien.bernachy-barbe@cea.fr



# Modélisation multi-physique du comportement sous irradiation des éléments combustibles du RJH

DER/SERJH/LFSC

DEC/SESC/LEVA



**L'objectif de ce stage est de modéliser l'évolution du comportement sous irradiation d'un élément combustible du RJH en fonction des caractéristiques du cœur, de la charge expérimentale et des positions des barres de contrôle.**

Le 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 combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et futurs et de produire des radioéléments à usage médical et industriel.

En tant que réacteur de recherche, le RJH utilisera un combustible très particulier, spécialement conçu pour lui. Il ne bénéficie donc pas du même retour d'expérience que celui des centrales électriques. Ce stage vise à obtenir plus de détails sur la manière dont ce combustible va vieillir au cours de son utilisation dans le RJH.

La première partie s'intéressera à la modélisation neutronique de l'évolution sous irradiation des caractéristiques de l'élément combustible (évolution isotopique, distribution de puissance, flux de neutrons).

La deuxième partie exploitera directement les données produites dans la première partie pour modéliser le comportement thermomécanique de l'élément combustible du RJH en fonction de son historique d'irradiation. L'étude s'intéressera en particulier à l'impact des lois de fluage sur les conditions de déformation et de contrainte mécanique de l'élément combustible

en cours d'irradiation.

Le stage se déroulera dans deux unités distinctes de l'institut IRESNE du CEA à Cadarache. La première partie neutronique se fera au Département d'Etude des Réacteurs, dans le Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz (SERJH) ; la deuxième partie thermomécanique se fera au Département d'Etude du Combustible, dans le Service d'Etude et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC). Le stagiaire bénéficiera ainsi de la proximité immédiate de spécialistes de la modélisation des réacteurs expérimentaux dans les deux unités.

Les simulations neutroniques seront réalisées à partir de la plateforme logicielle nommée « HORUS », dédiée aux études de conception, d'exploitation et de sûreté du RJH.

Les simulations thermomécaniques (3D) seront réalisées avec le code aux éléments finis MAIA de la plateforme logicielle PLEIADES, dédiée à la modélisation du comportement thermomécanique des éléments combustibles des réacteurs expérimentaux.

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

HORUS, PLEIADES/MAIA

## ■ Mots clés :

Simulation, Neutronique, Thermomécanique

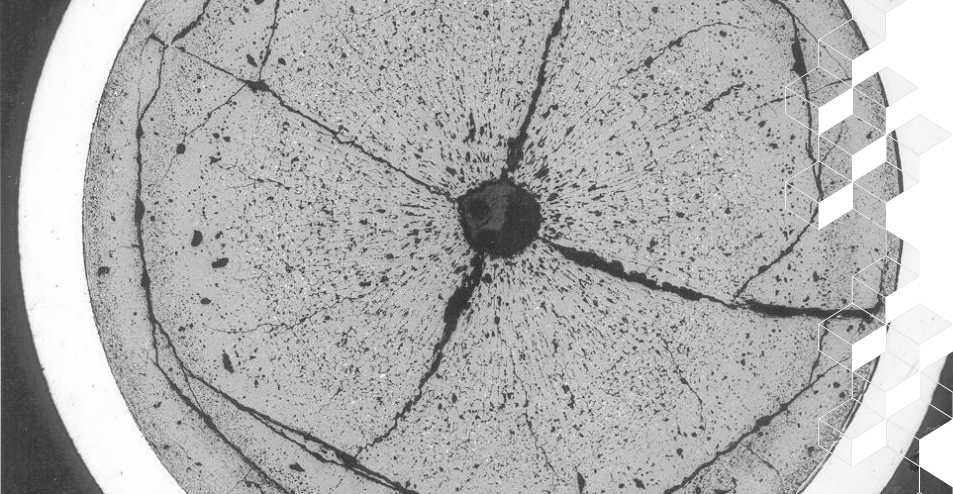
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

[denis.lorenzo@cea.fr](mailto:denis.lorenzo@cea.fr)  
[david.blanchet@cea.fr](mailto:david.blanchet@cea.fr)





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

DEC/SESC/LEVA

**Le but de ce stage est d'utiliser la nouvelle version de l'Outil de Calcul Scientifique PLEIADES-GERMINAL pour étudier l'expérience de transmutation SUPERFACT menée dans le réacteur 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.**

Grâce à leur caractère fissile, il est possible de transmuter certains actinides à longue durée de vie et haute activité comme l'américium et le neptunium en réacteur rapide à caloporteur sodium, ce qui limite les problématiques liées à leur gestion en tant que déchets. Pour démontrer la faisabilité de cette transmutation, le CEA a mené entre 1984 et 1992 le programme d'irradiation PHENIX-SUPERFACT, au cours duquel 8 aiguilles contenant des actinides mineurs ( $^{241}\text{Am}$  et  $^{237}\text{Np}$ ) ont été irradiées dans le réacteur rapide expérimental PHENIX. Cette expérience est internationalement reconnue comme la plus représentative sur le thème du brulage des déchets radioactifs.

Les examens post irradiations réalisés sur ces aiguilles ont permis d'améliorer la compréhension du comportement des combustibles enrichis en actinides mineurs, en vue de leur possible utilisation en réacteurs de puissance. Ils ont également été utilisés pour qualifier l'outil de calcul scientifique PLEIADES-GERMINAL développé au DEC/SESC, même si l'ensemble des observations expérimentales n'ont pas pu être fidèlement reproduites.

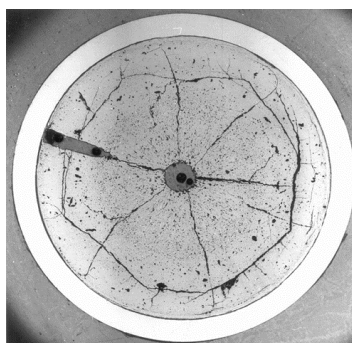
Une des explications possibles de ces écarts réside dans les possibles imprécisions du calcul de neutronique utilisé pour évaluer les

conditions d'irradiation dans les années 90. Pour pallier ce défaut, de nouveaux calculs ont été réalisés par le DER/SPRC pour évaluer plus précisément ces conditions d'irradiation en utilisant des codes neutroniques de dernière génération.

Le but du stage proposé ici est donc d'utiliser ces nouvelles données neutroniques pour simuler les aiguilles expérimentales de l'expérience SUPERFACT avec la dernière version de 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.

#### Encadrants :

- Florian MARCONI,
- Nathalie CHAUVIN,
- Tommaso BARANI.



#### ■ Formation souhaitée :

Bac +5 en matériaux

Master / École d'ingénieur

#### ■ Durée du stage :

6 mois

#### ■ Méthode/logiciel(s):

PLEIADES-GERMINAL ; python

#### ■ Mots clés :

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

#### ■ Possibilité de thèse :

Oui

#### ■ Contact :

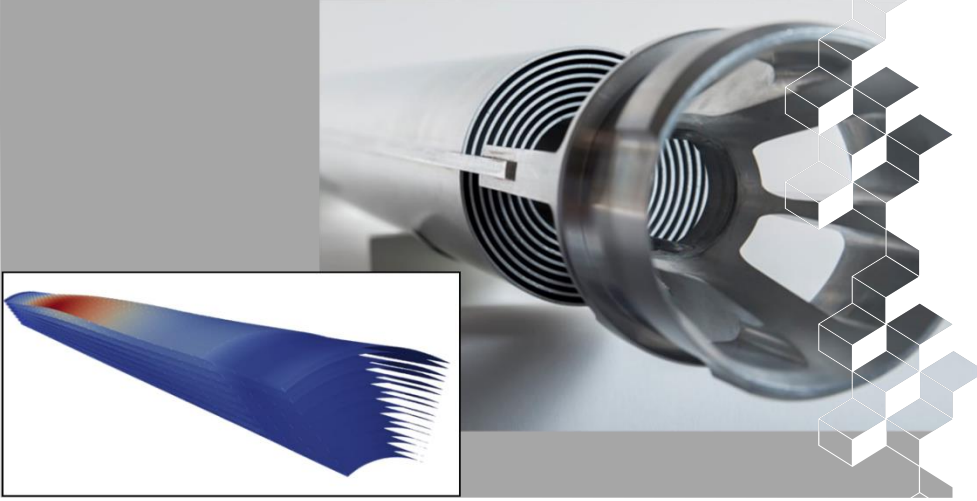
MARCONI Florian

[florian.marconi@cea.fr](mailto:florian.marconi@cea.fr)



# Développement de méthodes numériques pour la construction d'un modèle calibré de gonflement de combustible nucléaire

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 la totalité d'un assemblage combustible type RJH.

## Objectif du stage

Au sein du Laboratoire d'Expertises et de Validation des Applications combustibles multi-filières (LEVA), le stage aura pour objectifs **de développer et d'évaluer des méthodes numériques pour calibrer puis valider le modèle de gonflement des plaques de combustible type RJH dans le code de calculs PLEIADES/MAIA.**

La déroulé du stage nécessitera de :

- Prendre en main les phénomènes de comportement thermomécanique des plaques de combustible du Réacteur Jules Horowitz nécessaires à la compréhension du gonflement, en s'appropriant :
  - Les données expérimentales au cœur de l'exercice demandé ;
  - La modélisation du gonflement du combustible dans PLEIADES/MAIA, ses hypothèses, limites et sources

d'incertitudes, ainsi que les interdépendances avec les autres modèles physiques avec lesquels il est couplé ;

- Construire à partir de différents scripts Python préexistants un outil de calibration automatique du modèle implémenté dans l'Outil de Calculs Scientifiques PLEIADES/MAIA.

Le stage permettra d'être force de proposition quant aux choix de méthodes numériques d'optimisation adaptées au problème (e.g. multi-objectifs, prise en compte de différentes sources d'incertitudes, outils de Machine Learning, etc.), dans un contexte où les exécutions de simulations 3D ont un coût non négligeable en temps de calculs.

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

- Proposer un outil de calibration automatique documenté et le plus générique possible ;
- Consolider les analyses en proposant des éléments critiques vis-à-vis des résultats obtenus (études de sensibilité, etc.) ;
- Revisiter voire combiner ou enrichir d'autres modèles de gonflement existants, en vue de leur appliquer ce processus de calibration puis de comparer les résultats entre modèles.

## Compétences

- Une expérience avec des packages Python spécialisés pour le développement d'algorithmes d'optimisation et/ou de calibration (études de sensibilité, métamodèles, etc.) est fortement appréciée.
- Une expérience avec la simulation thermomécanique et/ou la physique du combustible est un plus apprécié.

## ■ 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, Environnement Linux et/ou Windows

## ■ Mots clés :

Simulation, Modélisation, Mathématiques appliquées, Optimisation, Mécanique, RJH

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

MEYRAND Louis  
louis.meyrand@cea.fr



# Numerical methods for the calibration of a nuclear fuel swelling model

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 JHR-type fuel assembly.

## Internship objective

Within the Laboratory for Expertise and Validation of Multi-Reactor Fuel Applications (LEVA), the internship will aim to **implement and evaluate numerical methods for calibrating and then validating the swelling model of JHR-type fuel plates in the PLEIADES/MAIA computational code.**

The internship will require:

- Understanding the thermomechanical behavior phenomena of the fuel plates of the Jules Horowitz Reactor related to the swelling model, by familiarizing oneself with:
  - The relevant experimental data
  - The modeling of fuel swelling in PLEIADES/MAIA, including its assumptions, limitations, sources of uncertainties, and

interdependencies with other physical models with which it is coupled

- Implementing, based on various pre-existing Python scripts, an automatic calibration tool for the model implemented in PLEIADES/MAIA.

The internship will allow for proposing suitable numerical optimization methods adapted to the problem (e.g., multi-objective, consideration of various sources of uncertainties, Machine Learning tools, etc.), in a context in which 3D simulations has a significant computational cost.

The work may include the following points of interest:

- Propose a documented and as generic as possible automatic calibration tool
- Strengthen the analyses by providing critical elements regarding the results obtained (sensitivity studies, etc.)
- Revisit, combine, or enhance other existing swelling models, with the aim of applying this calibration process to them and comparing the results between models.

## Skills

- Experience with specialized Python packages for the development of optimization and/or calibration algorithms (sensitivity studies, metamodels, etc.) is highly valued.
- Experience with thermomechanical simulation and/or fuel physics is also appreciated.

## ■ Formation souhaitée :

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

Interest in numerical simulation applied to multiphysics problems

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, PLEIADES/MAIA, Linux and/or Windows environment

## ■ Mots clés :

Simulation, Modeling, Applied Mathematics, Optimization, Mechanics

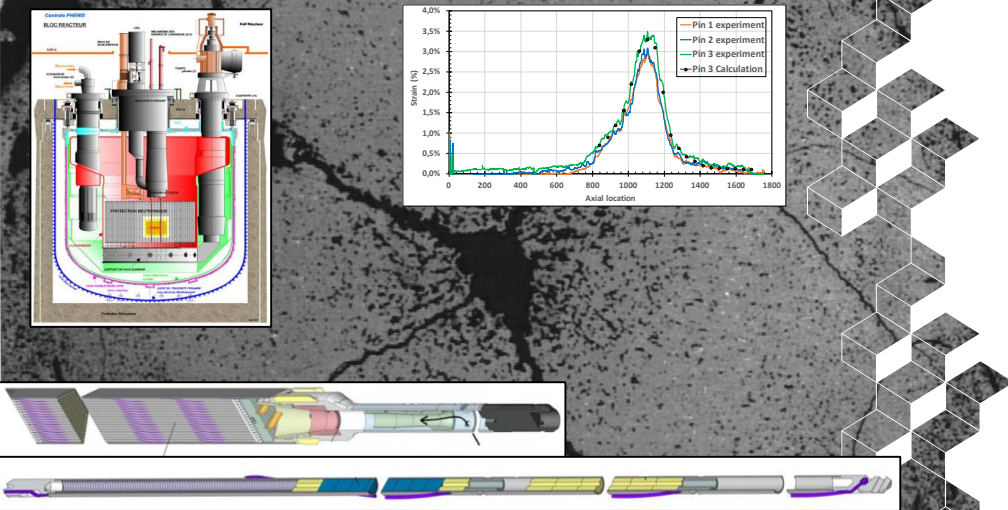
## ■ Possibilité de thèse :

No

## ■ Contact :

MEYRAND Louis  
louis.meyrand@cea.fr





# Simulation du comportement thermomécanique sous irradiation d'aiguilles combustibles RNR

DEC/SESC/LEVA

Afin de réaliser des études et expertises, le CEA développe des Outils de Calcul Scientifique (OCS) du comportement thermomécanique des combustibles. Ce sujet s'inscrit dans le cadre de l'amélioration continue de la modélisation pour mieux prédire le comportement du combustible sous irradiation. La validation du code de performance est soutenue par de nombreuses expériences d'irradiation. Le sujet proposé vise à étudier l'une d'elles afin d'élargir la base de validation actuelle du code et à optimiser l'un de ses modèles pour améliorer les prédictions.

GERMINAL est l'outil de calcul de référence de la plateforme PLEIADES développé au CEA pour décrire finement le comportement thermomécanique et physico-chimique du combustible des réacteurs à neutrons rapides [https://cea.hal.science/cea-02339742v1]. Le comportement en réacteur des aiguilles combustibles des RNR-Na dépend de leurs conditions d'irradiation et des propriétés des matériaux qui les constituent. Ces grandeurs impactent fortement les températures atteintes dans la pastille combustible.

Les objectifs du stage seront d'étudier le comportement sous irradiation du combustible en utilisant l'OCS GERMINAL et de contribuer à améliorer la modélisation d'une aiguille combustible qui s'est fortement déformée sous irradiation. L'étude s'appuiera sur le retour d'expériences d'irradiations réalisées par le passé dans le réacteur Phénix et sur des résultats expérimentaux.

La première étape consistera à optimiser les paramètres des lois de déformation du matériau de gaine afin de reproduire la déformation finale des aiguilles. La vérification des données relatives à la fabrication des aiguilles et leurs conditions d'irradiation permettra ensuite de fiabiliser et de constituer le jeu de données nécessaire aux calculs

thermomécaniques.

La seconde étape consistera à réaliser des calculs avec GERMINAL sur une ou plusieurs aiguilles de l'assemblage afin d'évaluer le comportement sous irradiation de ce type d'objet. Les résultats seront comparés aux résultats des examens post-irradiation disponibles.

Une étude de sensibilité pourra être également proposée pour quantifier les incertitudes.

Cette expérience permettra d'élargir la base de validation actuelle de GERMINAL en conditions normales de fonctionnement et d'améliorer à terme la modélisation globale du comportement du combustible dans le cas d'aiguilles fortement déformées. L'amélioration de la modélisation attendue contribuera également à soutenir des études en cours sur la modélisation de lois de propriétés thermiques du combustible irradié.

## ■ Formation souhaitée :

MASTER 2 ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Outil de calcul scientifique GERMINAL (Linux), MS Word, Excel, Powerpoint, (python)

## ■ Mots clés :

Matériaux – Simulation – Modélisation - Comportement thermomécanique

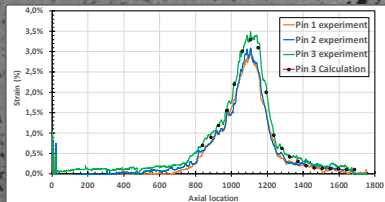
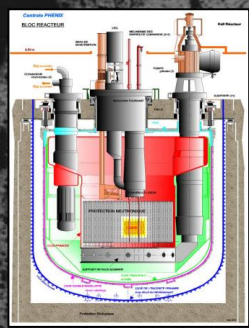
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

VIALARD Isabelle  
Isabelle.viallard@cea.fr





## Simulation of the thermomechanical behavior of SFR fuel pins under irradiation

DEC/SESC/LEVA

In order to carry out studies and expertise, the CEA develops codes to simulate the fuel thermomechanical behavior. This topic is part of the continuous improvement of modelling to better predict the behavior of fuel under irradiation. The code validation is supported by numerous irradiation experiments. The aim of this subject is to study one of these in order to broaden the code's current validation base, and to optimize one of its models to improve predictions.

GERMINAL is the reference calculation tool of the PLEIADES platform, developed at the CEA to describe in detail the thermomechanical and physico-chemical behavior of fast neutron reactor fuel [https://cea.hal.science/cea-02339742v1]. The SFR fuel pins behavior depends on their irradiation conditions and the properties of their constituent materials. These factors have a major impact on the temperatures reached in the fuel pellet.

The aims of the internship will be to study the behavior under irradiation of fuel using the GERMINAL scientific computing tool, and to help improve the modelling of a fuel pin that has undergone severe deformation under irradiation. The study will be based on experiments irradiated in the Phénix reactor and on experimental results.

The first step will be to optimize the parameters of the cladding material deformation laws in order to reproduce the final deformation of the fuel pins. Verification of the fuel pins manufacturing data and their irradiation conditions will then make it possible to establish a reliable data set for thermomechanical calculations.

In the second stage, GERMINAL will be used to perform calculations on

several fuel pins of the sub-assembly, in order to assess the irradiation behavior of this type of object. The results will be compared with available post-irradiation examinations.

A sensitivity study may also be proposed to quantify uncertainties.

This experiment will broaden the current validation database of the GERMINAL code under normal operating conditions, and ultimately improve the overall modelling of fuel behavior in the case of highly deformed pins. The expected improvement in modelling will also help to support ongoing studies into the modelling of irradiated fuel thermal property laws.

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 or final year of engineering school

### ■ Durée du stage :

6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

GERMINAL code (under Linux), MS Word Excel Powerpoint, (python)

### ■ Mots clés :

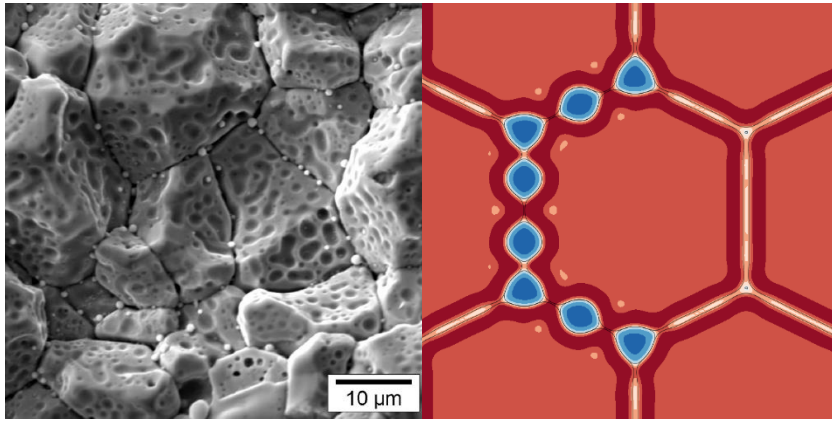
Materials – Simulation – Modelling - Thermomechanical behavior

### ■ Possibilité de thèse :

No

### ■ Contact :

VIALLARD Isabelle  
Isabelle.viallard@cea.fr



# Simulation numérique du comportement des gaz de fission dans la microstructure des combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C

**Dans le cadre de l'optimisation des réacteurs nucléaires, ce stage propose d'explorer des méthodes de simulation numérique innovantes appliquées aux combustibles. En utilisant des techniques et des logiciels de conception récente, il permettra de plonger au cœur des phénomènes microscopiques pour comprendre et prédire leur impact sur le comportement macroscopique des éléments combustibles d'un réacteur.**

## Contexte

Les combustibles nucléaires, notamment l'oxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) et les oxydes mixtes d'actinides, jouent un rôle crucial dans le fonctionnement du réacteur et la rationalisation des déchets radioactifs. La compréhension et la prédiction de leur comportement sont essentielles pour améliorer la sécurité et l'efficacité du parc nucléaire actuel et futur.

Un aspect clé concerne les gaz de fission générés lors des réactions de fission. Ces atomes de gaz, peu solubles, forment des bulles nanométriques qui grossissent pendant l'exploitation du combustible. Le développement d'un réseau de bulles à l'échelle des grains (quelques micromètres) affecte significativement les propriétés du combustible. La simulation numérique complète la caractérisation expérimentale en modélisant la formation et l'évolution des bulles, en prédisant l'évolution des propriétés physiques sous irradiation, et en accélérant la conception de nouveaux types de combustible aux performances accrues.

## Objectifs du stage

Le/la candidat-e contribuera au développement et l'amélioration des modèles de simulation du comportement des gaz de fission dans la microstructure des combustibles nucléaires. Ces modèles sont fondamentaux pour prédire les phénomènes tels que le gonflement, la déformation et la fragmentation des grains.

## Les missions

- Réaliser des simulations du comportement des gaz dans l' $\text{UO}_2$  à l'échelle de la microstructure, en utilisant des modèles basés sur la méthode du champ de phase et la théorie cinétique (« rate theory »).
- Comparer les résultats entre différents codes de simulation Inferno (2D/3D), Margaret (1D), Sciantix (0D) et avec des mesures expérimentales.
- Analyser l'évolution des bulles de gaz et ses effets sur le comportement macroscopique du combustible.

## Compétences à acquérir

- Maîtrise de techniques de simulation numérique avancées.
- Compréhension approfondie des phénomènes physiques multiéchelle dans les combustibles nucléaires.
- Analyse et interprétation de données complexes issues des simulations et des expériences.
- Démarche scientifique de recherche appliquée à des enjeux énergétiques et environnementaux majeurs.

Ce stage offre l'opportunité de contribuer à la recherche de pointe dans le domaine de l'énergie nucléaire tout en développant des compétences précieuses en simulation numérique et en physique des matériaux.

## ■ Formation souhaitée :

Physique du solide  
Physique numérique  
Science des matériaux  
Mécanique des matériaux

## ■ Durée du stage :

6 mois (stage de fin d'études)

## ■ Méthode/logiciel(s):

Champ de phase, rate theory  
(Inferno, Sciantix, Margaret)

## ■ Mots clés :

Combustibles nucléaires, Gaz de fission, Microstructure, Simulations numériques

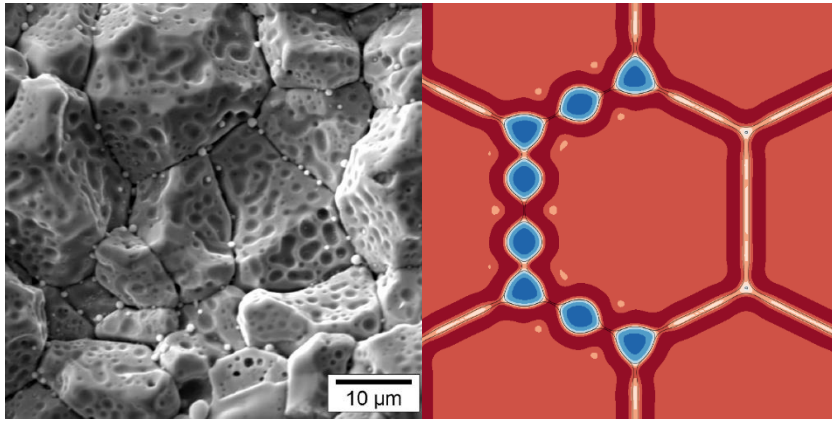
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

MESSINA Luca  
luca.messina@cea.fr





# Simulation of fission gas behavior and microstructure evolution of nuclear fuels

DEC/SESC/LM2C

**As part of the ongoing efforts to enhance the efficiency of nuclear reactors, this internship aims to explore innovative computational methods applied to nuclear fuel. Using the recent modeling techniques and software, this project will delve into microscopic phenomena to better understand and predict their impact on the macroscopic behavior of reactor fuel elements.**

## Context

Nuclear fuels, especially uranium oxide ( $\text{UO}_2$ ) and mixed oxides of uranium and plutonium (MOX), play a crucial role in reactor operation and the management of radioactive waste. Understanding and predicting their behavior is essential for improving the safety and efficiency of both current and future nuclear reactors.

A key aspect is the behavior of fission gases generated by fission reactions. This poorly soluble gas collects into nanometric bubbles that grow over time during fuel operation. The development of a network of bubbles at the grain scale (a few micrometers) significantly affects the fuel properties and mechanical behaviour. Computer simulations complement experimental characterization by modeling the formation and evolution of these bubbles, predicting changes in physical properties under irradiation, and accelerating the design of new, higher-performance fuel concepts.

## Internship objectives

The candidate will contribute to the development and improvement of simulation models for fission gas behavior in the microstructure of nuclear fuels. These models are essential for predicting phenomena such as swelling, deformation, and grain fragmentation.

## Tasks

- Perform simulations of gas behavior in  $\text{UO}_2$  at the microstructural scale, using models based on phase-field and rate-theory methods.
- Compare results from various simulation codes, including Inferno (2D/3D), Margaret (1D), Sciantix (0D), and experimental data.
- Analyze the evolution of gas bubbles and their effects on the macroscopic behavior of the fuel.

## What you'll learn

- Proficiency in advanced computer simulation techniques.
- In-depth understanding of multiscale physical phenomena in nuclear fuels.
- Ability to analyze and interpret complex data from simulations and experiments.
- A scientific approach to research applied to major energy and environmental challenges.

This internship offers the opportunity to contribute to cutting-edge research in the field of nuclear energy while developing valuable skills in computational modeling and materials physics.

## ■ Formation souhaitée :

Solid State Physics  
Computational Physics  
Materials Science  
Mechanics of materials

## ■ Durée du stage :

6 months (Master's thesis)

## ■ Méthode/logiciel(s):

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

## ■ Mots clés :

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

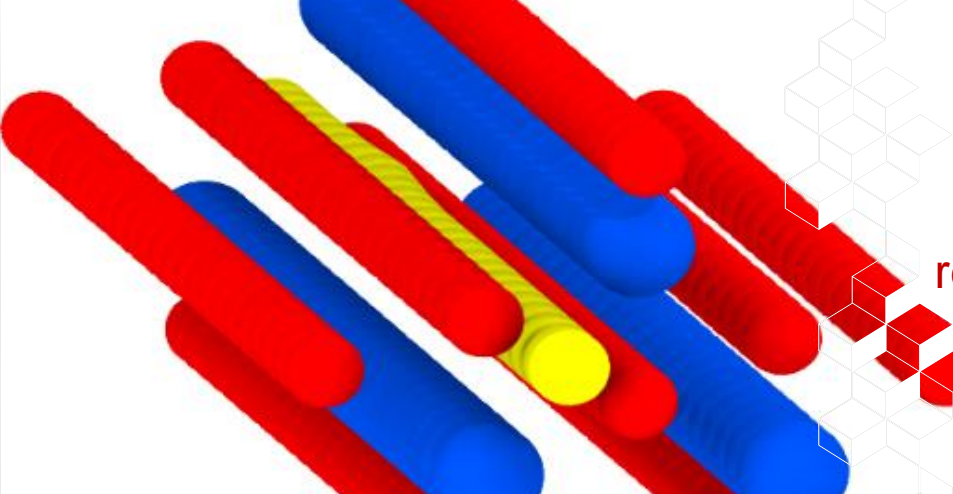
## ■ Possibilité de thèse :

Yes

## ■ Contact :

MESSINA Luca  
luca.messina@cea.fr





# Plasticité cristalline de l' $\text{UO}_2$ compréhension des rôles respectifs du glissement et de l'interaction des dislocations

DEC/SESC/LM2C

**Le dioxyde d'uranium  $\text{UO}_2$  est le combustible nucléaire de référence dans les réacteurs à eau pressurisée (REP). La connaissance du comportement mécanique de ce matériau céramique polycristallin à haute température est un enjeu majeur de sûreté nucléaire. Dans ce cadre, un objectif important est de pouvoir faire le lien entre les mécanismes à l'échelle atomique et les contraintes et déformations utilisées dans les lois de comportement de l'ingénieur. Cela passe par des simulations de la plasticité cristalline à l'aide de la Dynamique des Dislocations.**

## Objectifs:

L'objectif principal de ce stage est d'étudier par des simulations à l'échelle du cristal  $\text{UO}_2$  la mobilité d'une population de dislocations afin de pouvoir faire le lien entre la contrainte plastique et les mécanismes élémentaires contrôlant le mouvement des dislocations. Ces simulations à l'aide de la Dynamique des Dislocations (DD) permettront de justifier physiquement les modèles et les paramètres utilisés dans les lois de comportement viscoplastique du combustible à haute température.

En s'appuyant sur la DD on simulera un essai de plasticité sur un élément de volume de quelques microns avec le glissement des dislocations à l'origine des déformations irréversibles du cristal. La DD permet d'imposer une vitesse de déformation à l'élément de volume et calcule la contrainte moyenne qui peut être comparée à des données expérimentales à l'échelle macroscopique. La compréhension attendue de ces simulations est d'expliquer si la contrainte moyenne dépend des forces de friction de réseau nécessaires pour le glissement des dislocations ou des contraintes internes liées à l'interaction des dislocations entre elles. Pour ne pas introduire de biais empirique dans cette analyse il faudra utiliser des lois de glissement des dislocations obtenues par ailleurs par simulation à l'échelle atomique.

## Etapes du stage:

Le ou la stagiaire débutera le stage par une phase d'étude bibliographique pour s'imprégner d'une part du contexte autour du combustible nucléaire et d'autre part de la physique sous-jacente au sujet de stage : plasticité cristalline, dynamique des dislocations, glissement thermiquement activé et interaction des dislocations. En parallèle de la bibliographique, une étape de prise en main des outils de calculs sera réalisée (environnement Linux, code NUMODIS pour la DD, visualisation 3D paraview,...). Enfin, le ou la stagiaire rentrera dans une phase de production et analyse des résultats de simulation avec la définition d'une grille de calcul permettant de bien identifier les études paramétriques nécessaires pour répondre à la question posée.

## Environnement de travail:

Le ou la stagiaire sera accueilli(e) au sein du Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles situé sur le site de Cadarache. Ce laboratoire très dynamique, spécialisé dans la modélisation des propriétés fondamentales et du comportement des combustibles nucléaires, est composé de 11 chercheurs permanents et autant d'étudiants en thèse. Le centre de Cadarache est situé en Provence, entre les parcs naturels du Verdon et du Lubéron, offrant un cadre de travail très appréciable. Le CEA met à disposition des salariés des lignes de bus gratuites permettant de rejoindre le centre depuis les principales villes alentours (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis...). Le ou la stagiaire aura également la possibilité de faire du télétravail après une période d'acclimatation au sein de l'équipe.

## ■ Formation souhaitée :

Master 2

## ■ Durée du stage :

5 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Plasticité cristalline/ NUMODIS /  
Paraview / Environnement Linux

## ■ Mots clés :

Combustibles nucléaires,  
plasticité cristalline, glissement  
et interaction des dislocations

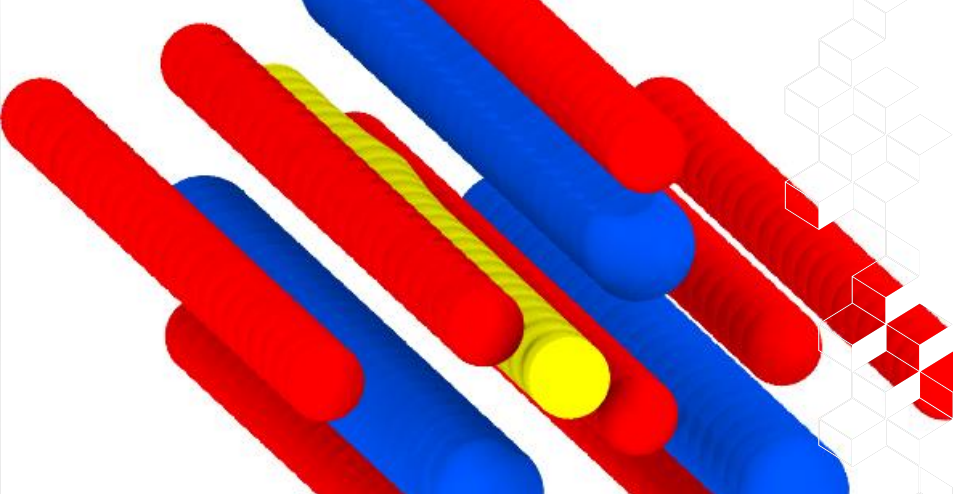
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

MICHEL Bruno  
[Bruno.michel@cea.fr](mailto:Bruno.michel@cea.fr)





# Crystal plasticity of UO<sub>2</sub> understanding the respective contributions of dislocation gliding and their interactions

DEC/SESC/LM2C

Uranium dioxide UO<sub>2</sub> is the reference nuclear fuel in pressurised water reactors (PWRs). Knowledge of the mechanical behaviour of this polycrystalline ceramic material at high temperature is a major nuclear safety issue. In this context, one important objective is to be able to establish a link between the mechanisms at atomic scale and the stresses and strains used in engineering mechanical laws. This requires crystal plasticity simulations using Dislocation Dynamics approach.

## Objectives:

The main objective of this internship is to study the mobility of a population of dislocations using simulations at the scale of the UO<sub>2</sub> crystal in order to establish the link between plastic stress and the elementary mechanisms controlling the movement of dislocations. For this simulations using Dislocation Dynamics (DD) will be used in order to physically justify the models and parameters used in the viscoplastic behaviour laws for fuel at high temperatures. Using DD, we will simulate a plasticity test on an element with a size of a few microns, with the sliding of dislocations inducing irreversible strains in the crystal. DD is used to impose a strain rate on the volume element and then calculates the average stress, which can be compared with experimental data at a macroscopic scale. The expected understanding of these simulations is to explain whether the average stress depends on the lattice friction forces, necessary for dislocations to glide, or on the internal stresses linked to the interaction of dislocations with each other. In order not to introduce an empirical bias into this analysis, it will be necessary to use dislocation sliding laws obtained by simulation at the atomic.

## Stages of the internship:

The internship will start with a bibliographical study phase to familiarize him/herself with the nuclear fuel context and the physics underlying the subject : crystalline plasticity, dislocation dynamics, thermally activated gliding and dislocation interaction. In addition to the bibliography, the trainee will be given the opportunity to expend his/her knowledge of the calculation tools (Linux environment, NUMODIS code for DD, Paraview 3D visualisation, etc.). Finally, the trainee will enter a phase of production and analysis of the simulation results with the definition of a calculation grid to clearly identify the parametric studies required to answer the question posed.

## Work environment:

The intern will be welcomed within the Fuel Behavior Modeling Laboratory located at the Cadarache site. This highly dynamic laboratory specializes in modeling the fundamental properties and behavior of nuclear fuels and consists of 11 permanent researchers and an equal number of doctoral students. The Cadarache center is located in Provence, between the natural parks of Verdon and Lubéron, offering a very pleasant working environment. CEA provides employees with free bus lines to the main nearby cities (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis, etc.). The intern will also have the opportunity to work remotely after an acclimatization period with the team

### ■ Formation souhaitée :

Master 2

### ■ Durée du stage :

5 to 6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Dislocation dynamics /  
NUMODIS / Paraview / Linux  
environment

### ■ Mots clés :

Nuclear fuel, crystal plasticity,  
dislocations, gliding and  
interaction

### ■ Possibilité de thèse :

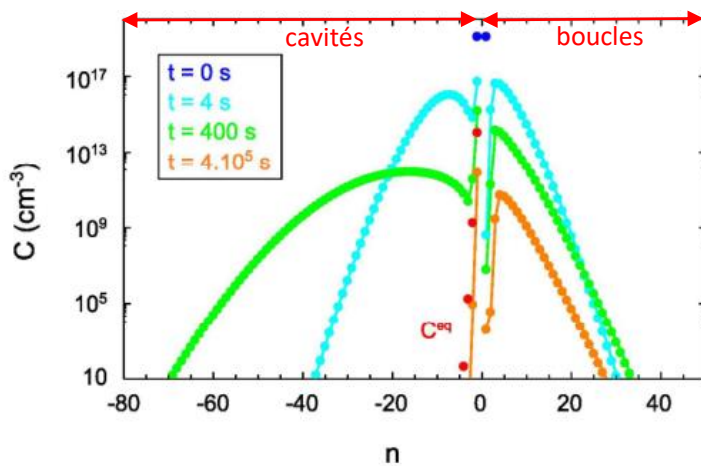
Yes

### ■ Contact :

MICHEL Bruno

[Bruno.michel@cea.fr](mailto:Bruno.michel@cea.fr)





## Un jumeau numérique pour prédire l'évolution microstructurale du joint de grains d'un combustible sous irradiation

DEC/SESC/LM2C

Un exemple de résultat de calcul cinétique pour une irradiation aux ions d'un échantillon. Chaque courbe représente la distribution de tailles d'amas issus de l'agrégation des défauts issus du dommage d'irradiation.  $n < 0$  : concentration des cavités comportant  $|n|$  sites du réseau cristallin.  $n > 0$  : concentration en boucles de dislocation comportant  $n$  sites du réseau

**Comme d'autres secteurs industriels, le nucléaire développe des « jumeaux numériques », applications permettant de simuler le comportement d'un composant industriel, voiture, usine, réacteur, ou dans notre cas crayon combustible. Le travail proposé se situe dans cette démarche et contribue au développement d'un jumeau numérique de grain / joint de grains permettant d'en simuler l'évolution microstructurale sous irradiation.**

Le combustible nucléaire (oxyde d'uranium) voit sa microstructure fortement endommagée lors de l'irradiation en réacteur: les atomes issus de la fission des noyaux uranium déplacent en cascade les atomes du matériau, créant des défauts d'irradiation (lacunes et interstitiels) dont l'agrégation provoque l'apparition progressive, à l'intérieur des grains d' $\text{UO}_2$ , de cavités et de boucles de dislocation. Les atomes de gaz rares (insolubles) générés par la fission (xénon, krypton) peuvent ségréger dans ces cavités. Ces défauts étendus influencent notamment le volume du matériau, son fluage, sa rétention vis-à-vis des gaz de fission. Ce phénomène peut être modélisé par dynamique d'amas (DA): jeu d'équations cinétiques représentant les réactions chimiques d'agrégation des défauts sous l'effet de leur diffusion dans le matériau.

Or, comme les gaz rares peuvent migrer vers les joints de grains et y donner lieu au même genre de phénomène de nucléation-croissance de bulles. L'objectif du stage est donc d'étendre l'utilisation de la DA à la description de l'évolution microstructurale du joint de grains.

On prévoit pour cela quelques étapes clés:

1. Théorie: adapter le modèle au cas d'un milieu plan (alors que le grain est tridimensionnel), notamment rechercher comment s'écrivent les paramètres cinétiques des réactions chimiques d'agrégation des défauts

2. Numérique-informatique: Coupler le modèle DA du grain à celui du joint. IL s'agira d'un développement spécifique dans le code du CEA-EDF Crescendo.
3. Simulation-interprétation: Le modèle sera ensuite appliqué à de nouvelles situations, comme l'irradiation en pile du combustible dans le but de prédire la microstructure (densités de bulles ou de boucles et lignes de dislocation, à la fois en volume et aux joints de grains).

Ce stage offre ainsi l'opportunité au candidat, à partir d'une position centrale et d'un point de vue synthétique, de contribuer au développement de la physique numérique appliquée à la modélisation multiéchelle et de découvrir des activités variées et complémentaires de ce domaine (théorie, numérique, simulation-interprétation). Il lui permettra d'expérimenter par lui-même en quoi des outils de simulation basés sur les données microscopiques les plus fondamentales permettent de traiter et expliquer des situations pratiques.

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

E. Gilibert, D. Horlait, M.-F. Barthe, P. Desgardin, M.-L. Amany, G. Carlot, M. Gérardin, S. Maillard, and T. Wiss, D2.2 - Behaviour of Fission Gases and Helium in Uranium Dioxide, EC report, 2020.

### ■ Formation souhaitée :

M1 ou M2 ou école d'ingénieur en physique des matériaux, modélisation, physique numérique

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

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

### ■ Mots clés :

Physique numérique, cinétique chimique, irradiation des matériaux

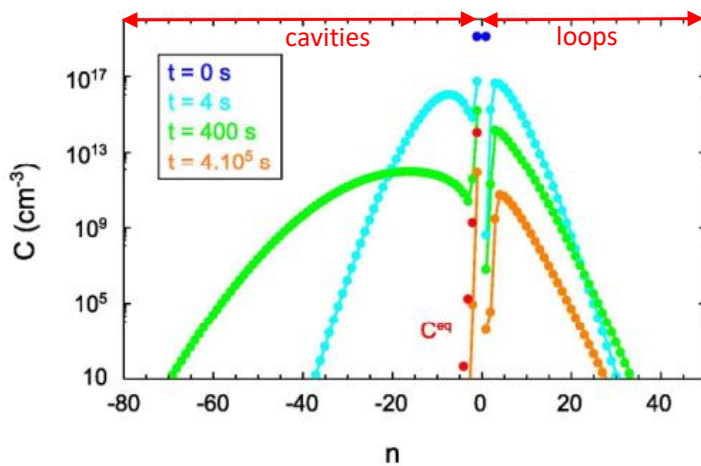
### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr





## A digital twin to predict the microstructural evolution of the grain boundary of a fuel under irradiation

DEC/SESC/LM2C

An example of a kinetic calculation result for ion irradiation of a sample. Each curve represents the cluster size distribution resulting from the aggregation of defects caused by irradiation damage.  
 $n < 0$ : concentration of cavities containing  $|n|$  lattice sites.  $n > 0$ : concentration of loops containing  $n$  lattice sites

**Like other industrial sectors, the nuclear industry is developing 'digital twins', applications that simulate the behaviour of an industrial component, such as a car, plant, reactor or, in our case, a fuel rod. The proposed work is part of this approach and contributes to the development of a digital twin of a grain / grain boundary that can be used to simulate its microstructural evolution under irradiation.**

The microstructure of nuclear fuel (uranium oxide) is severely damaged during irradiation in a reactor: the atoms produced by the fission of uranium nuclei displace the atoms in the material in a cascade, creating irradiation defects (vacancies and interstitials) whose aggregation leads to the gradual appearance of cavities and dislocation loops. These extended defects influence the volume of the material, its creep and its retention of fission gases. The physical model of the phenomenon is cluster dynamics: a set of kinetic equations representing the chemical reactions of defect aggregation by diffusion in the material.

Rare gases can migrate towards grain boundaries and give rise to the same type of bubble nucleation-growth phenomenon. The aim of the internship is therefore to extend the use of DA to predict the microstructural evolution of the grain boundary.

The main steps planned to achieve this are

1. Theory: adapting the model to the case of a planar medium (while the grain is three-dimensional), in particular studying how to write the kinetic parameters of the chemical reactions that lead to the aggregation of defects.
2. Computation: Coupling the DA model of the grain to that of the joint. This will be a specific development in the CEA-EDF Crescendo code.

3. Simulation-interpretation: The model will then be applied to new situations, such as irradiation in fuel cells, with the aim of predicting the microstructure (density of bubbles or loops and dislocation lines, both in volume and at grain boundaries).

This internship offers the candidate the opportunity to contribute, from a central position and from a synthetic point of view, to the development of numerical physics applied to multiscale modelling and to discover diverse and complementary activities in this field (theory, numerics, simulation-interpretation). It will allow students to experience for themselves how simulation tools, based on the most fundamental microscopic data, can be used to treat and explain practical situations.

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

E. Gilibert, D. Horlait, M.-F. Barthe, P. Desgardin, M.-L. Amany, G. Carlot, M. Gérardin, S. Maillard, and T. Wiss, D2.2 - Behaviour of Fission Gases and Helium in Uranium Dioxide, EC report, 2020.

### ■ Formation souhaitée :

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

### ■ Durée du stage :

6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Using/improving simulation codes, simple coding of physical mechanisms

### ■ Mots clés :

Numerical Physics  
Chemical Kinetics  
Materials irradiation

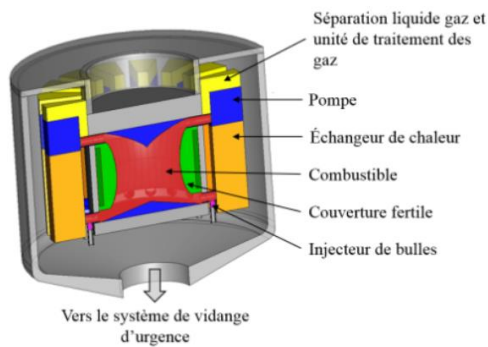
### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr





# Analyse de sensibilité pour l'identification des principaux paramètres impactant le taux de vide dans un réacteur à sels fondus

DEC/SESC/LM2C

- (a) Schéma conceptuel d'un réacteur à sels fondus. Le combustible est un liquide qui circule du cœur vers les échangeurs de chaleur.
- (b) Situation à éviter pour la sûreté : forte production de bulles comme dans un verre d'eau gazeuse.

**Le nouveau concept de réacteur à sels fondus est prometteur en termes de sûreté et de réduction des déchets. Une étape clé dans son développement est de faire la preuve de sa sûreté en toute situation. Le stage proposé contribuera à évaluer l'impact des bulles de gaz de fission sur la sûreté du réacteur. A partir d'un modèle physique détaillé de la nucléation et croissance de ces bulles, le candidat déterminera par une étude de sensibilité quels sont les paramètres de ce modèle qui impactent le plus la sûreté.**

Avec la relance du nucléaire, un ancien concept de réacteur innovant, le réacteur à sels fondus, est de nouveau à l'étude. Testé avec succès dans les années 60 (MSRE), ce réacteur à combustible liquide est réévalué au CEA dans une perspective de réduction des déchets. On étudie en particulier la précipitation des gaz de fission sous forme de bulles, susceptibles de dégrader les performances de sûreté du réacteur. Un modèle physique de formation de ces bulles est en cours de développement. Il permet d'évaluer le taux de vide dans le réacteur, critique pour la sûreté. Le but du stage est de développer une démarche pour hiérarchiser les différents paramètres du modèle (tant physiques que technologiques) vis-à-vis de leur impact sur le taux de vide.

Le stage se décompose en plusieurs étapes clés:

1. Théorie : déterminer la méthode et les outils statistiques adaptés pour l'analyse de sensibilité (indices de Sobol, ...)
2. Simulation-interprétation : en utilisant le modèle développé, mener l'analyse de sensibilité avec un outil dédié, la plateforme URANIE développée au CEA. Les résultats de cette analyse seront ensuite interprétés pour identifier les paramètres d'impact majeur.
3. Modélisation: participer aux travaux de développement du modèle sur les paramètres identifiés (recherche bibliographique, modélisation et implémentation).

Ce stage offre ainsi l'opportunité au candidat de contribuer au développement d'un modèle physique pour un réacteur en conception tout en renforçant ses compétences en analyse de données appliquée à la R&D industrielle. Il lui permettra d'expérimenter par lui-même en quoi l'analyse de sensibilité permet d'apporter des informations pratiques en phase de conception (de modèle ou de design). Au cours de ce stage, le candidat pourra interagir avec des acteurs de différents domaines (physique, design).

P. N. Haubenreich and J. R. Engel, [Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment](#), Nuclear Applications and Technology, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Feb. 1970.

CEA, [Tout s'explique : MSR, convertisseur d'actinides ?](#), [https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/MSR\\_Tout-s-explique.pdf](https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/MSR_Tout-s-explique.pdf)

J. B. Blanchard, G. Damblin, J. M. Martinez, G. Arnaud and F. Gaudier, [The Uranie platform: an open-source software for optimisation, meta-modelling and uncertainty analysis](#), EPJ Nuclear Sci. Technol., Volume 5, 2019.

## ■ Formation souhaitée :

M1 ou M2 ou école d'ingénieur en génie mécanique, mécanique des fluides, physique numérique

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Plateforme d'analyse de sensibilité (URANIE), codage simple de modèles physiques (MATHEMATICA)

## ■ Mots clés :

Analyse de sensibilité, physique numérique, modélisation

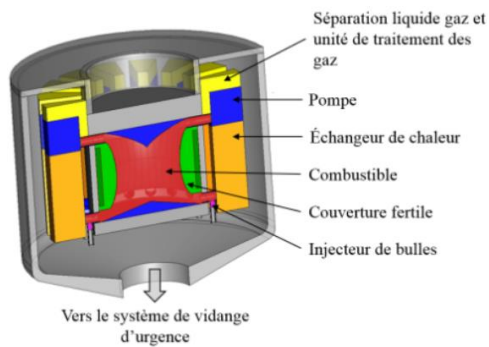
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr





# Sensitivity analysis for the identification of the main parameters impacting the void ratio in a molten salt reactor

DEC/SESC/LM2C

- Conceptual diagram of a molten-salt reactor. The fuel is a liquid that circulates from the core to the heat exchangers.
- Situation to be avoided for safety: high production of bubbles as in a glass of sparkling water.

**The new molten salt reactor concept is promising in terms of safety and waste reduction. A key step in its development is to demonstrate its safety in all situations. The proposed internship will help to assess the impact of fission gas bubbles on reactor safety. Based on a detailed physical model of the nucleation and growth of these bubbles, the intern will carry out a sensitivity study to determine which of the model's parameters have the greatest impact on safety.**

With the revival of the nuclear power industry, an old innovative reactor concept, the molten salt reactor, is being studied again. Successfully tested in the 1960s (MSRE), this liquid fuel reactor is being re-evaluated at the CEA with a view to reducing waste. In particular, we are studying the precipitation of fission gases in the form of bubbles, which could affect the reactor's safety performance. A physical model of the formation of these bubbles is being developed. It will be used to assess the reactor void ratio, which is critical for safety. The aim of the internship is to develop an approach for prioritizing the various parameters of the model (both physical and technological) in terms of their impact on the void ratio.

The internship is divided into several key stages:

- Theory:** identification of the method and statistical tools suitable for sensitivity analysis (Sobol indices, etc).
- Simulation-interpretation:** on the basis of the model developed, the sensitivity analysis is carried out using a specific tool, the URANIE platform developed at the CEA. The results of this analysis will then be interpreted in order to identify the main impact parameters.
- Modelling:** take part in the development of models for the parameters identified (bibliographical research, modelling and implementation).

development of a physical model for a reactor under design, while reinforcing his/her skills in data analysis applied to industrial R&D. It will also allow them to see for themselves how sensitivity analysis can provide practical information at the design stage (of a model or a design). During the internship, the candidate will be able to interact with people from different fields (physics, design).

P. N. Haubenreich and J. R. Engel, [Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment](#), Nuclear Applications and Technology, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Feb. 1970.

CEA, [Tout s'explique : MSR, convertisseur d'actinides ?](#), [https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/MSR\\_Tout-s-explique.pdf](https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/MSR_Tout-s-explique.pdf)

J. B. Blanchard, G. Damblin, J. M. Martinez, G. Arnaud and F. Gaudier, [The Uranie platform: an open-source software for optimisation, meta-modelling and uncertainty analysis](#), EPJ Nuclear Sci. Technol., Volume 5, 2019.

## ■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent in mechanical engineering, fluids mechanics, numerical physics

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

Sensitivity analysis (URANIE), simple coding of physical mechanisms (MATHEMATICA)

## ■ Mots clés :

Sensitivity analysis, Numerical physics, Modeling

## ■ Possibilité de thèse :

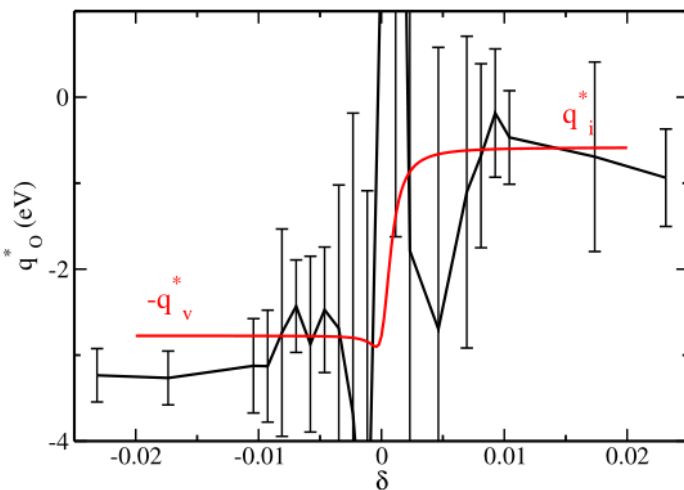
No

## ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr

This internship offers the candidate the opportunity to contribute to the





## Etude par dynamique moléculaire de la thermodiffusion dans les combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C

Chaleur de transport des atomes d'oxygène dans l' $\text{UO}_2$  en fonction de l'écart  $\delta$  à la stœchiométrie dans l'oxyde d'uranium. Chaque calcul de dynamique moléculaire classique est réalisé dans une boîte de 2592 atomes et représente un temps physique d'évolution du système de 4 ns. Il y a plusieurs simulations pour chaque barre d'erreur du graphique.

**Pour mieux comprendre le comportement des matériaux nucléaires durant leur passage en réacteur, la recherche en sciences des matériaux recourt de plus en plus à la simulation numérique multiéchelle, tant au niveau de la pièce d'ingénierie (mécanique du milieu continu...), qu'à celui du grain (champ de phases...) ou même de l'atome (calculs atomistiques). La thermodiffusion de l'oxygène dans le combustible nucléaire ( $\text{UO}_2$ ) est un phénomène important dont la complexité justifie une telle approche [1].**

Lors de son irradiation en réacteur, le combustible peut subir d'importants gradients thermiques provoquant la migration des atomes d'oxygène (thermodiffusion). Ce phénomène, à l'origine d'une modification des propriétés chimiques de matériau, est en général mal compris au niveau microscopique dans les solides, et particulièrement dans les composés iono-covalents. De plus, son paramètre clé, la chaleur de transport de l'oxygène  $Q^*$ , donnée d'entrée du modèle de la plateforme PLEIADES de simulation du combustible [2], est très difficile à mesurer, d'autant plus qu'il peut évoluer au cours de l'irradiation du matériau en réacteur. Pour cette raison le laboratoire développe les simulations atomistiques en vue de prédire cette grandeur.

Plusieurs méthodes de calculs de  $Q^*$  pour l'ion oxygène par dynamique moléculaire classique se sont révélées pertinentes [1]. En revanche cette technique n'est a priori pas adaptée au calcul de  $Q^*$  pour les défauts électroniques (polarons) : des calculs quantiques sont nécessaires en principe, mais ils demandent trop de ressources informatiques.

Le but du stage est donc de tester des méthodes de dynamique moléculaire classique adaptées au calcul approché de la chaleur de transport des électrons. L'ensemble des paramètres nécessaires sera déterminé tant par des calculs quantiques que classiques.

Ce sujet permettra au candidat de développer des compétences génériques en physique du solide, physique quantique, physique statistique à l'équilibre ou hors équilibre et également en calculs atomistiques sur des codes polyvalents de

DFT (ex. ABINIT) et de dynamique moléculaire (ex. LAMMPS) dans lequel le laboratoire dispose d'une expertise importante. Ces compétences peuvent s'appliquer à d'autres situations physiques et domaines industriels (liquides pétroliers, matériaux thermoélectriques...).

Cette action s'insère dans le programme de développement de la plateforme (PLEIADES) de simulation du combustible nucléaire regroupant dans un unique environnement tous les modèles décrivant le comportement du combustible dans sa totalité (mécanique, physico-chimie, thermodynamique, neutronique). Pour alimenter cette plateforme en paramètres matériaux, le laboratoire mène une recherche amont pour déterminer ces paramètres, à partir de calculs atomistiques et de simulations à plus grande échelle.

Cet environnement de travail riche, tant du point de vue de la physique que du génie logiciel, offre l'opportunité de découvrir un large panel de métiers de l'informatique et de la simulation en physique. Ce stage est également l'occasion de constater par soi-même en quoi des outils de simulation à l'échelle microscopique peuvent contribuer à traiter des situations pratiques.

### Références :

[1] Bareigts et al. « Molecular dynamics modeling of thermodiffusion in solids with charged defects using uranium dioxide as the case study ». *Chemical Engineering Science* 281 (2023): 119141. [doi.org/10.1016/j.ces.2023.119141](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119141).

[2] Konarski et al. *Journal of Nuclear Materials* 519:104, 2019

### ■ Formation souhaitée :

M1 ou M2 ou école d'ingénieur en physique numérique, physique de la matière condensée, physique des matériaux

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Code de Dynamique Moléculaire LAMMPS

### ■ Mots clés :

Physique numérique, Physique statistique, Calculs atomistiques, Dynamique moléculaire

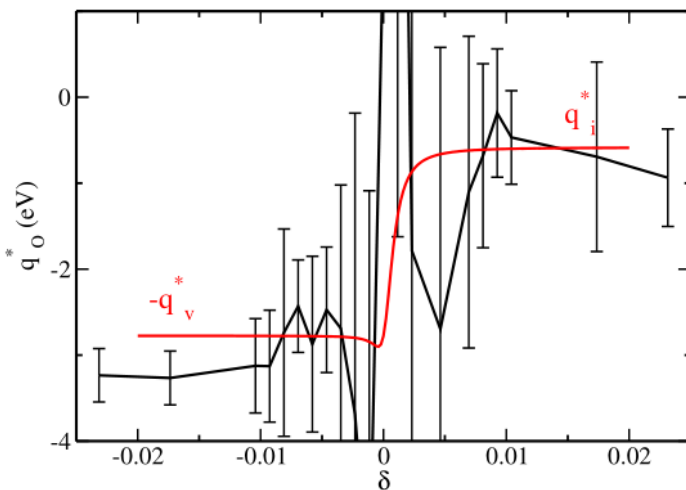
### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr





Heat of transport of the oxygen atoms in  $\text{UO}_2$  as a function of  $\delta$ , the deviation to stoichiometry in uranium oxide. Each Molecular Dynamics calculation is performed in a simulation box comprising 2592 atoms and represents a physical evolution time of 4 ns. There is several simulations for each error bar on the graph.

## Molecular dynamics simulation of thermodiffusion in nuclear fuel materials

DEC/SESC/LM2C

**Materials science is increasingly relying on multiscale simulation to address the complex in-reactor behaviour of nuclear materials, be it at the scale of the component (continuum mechanics,...), of the grain (phase field, rate theory...) or of the atoms (atomistic simulations). Thermodiffusion in nuclear fuel ( $\text{UO}_2$ ) is a phenomenon whose complexity requires such an approach [1].**

During irradiation, the fuel may experience a high thermal gradient that triggers the oxygen atoms migration (thermodiffusion). This phenomenon, inducing changes in the chemical characteristics of the material, is poorly understood at the microscopic level. Its key property, the heat of transport  $Q^*$ , is an input parameter for the thermodiffusion model of the PLEIADES platform [2]. Unfortunately, it is very difficult to measure and, moreover, strongly affected by the physicochemical in-reactor evolution of the material. For this reason, the lab is developing atomistic simulations in order predict this parameter.

Several methods of calculating  $Q^*$  for the oxygen ion using classical molecular dynamics have proved relevant [1]. However, this technique is not a priori suitable for calculating  $Q^*$  for electronic defects (polarons): quantum calculations are required in principle, but they are too computationally expensive. The aim of the internship is therefore to test classical molecular dynamics methods adapted to the approximate calculation of the electron/hole heat of transport. All necessary parameters will be determined using both quantum and classical calculations.

This topic will enable the candidate to develop general skills in solid state physics, quantum physics, equilibrium and non-equilibrium statistical physics and also in atomistic calculations using versatile DFT (e.g. ABINIT) and molecular dynamics codes (e.g. LAMMPS), in which the laboratory has considerable expertise. These skills can be applied to other physical situations and industrial fields (petroleum fluids, thermoelectric materials, etc.).

This project is linked to the development of the fuel simulation platform (PLEIADES), which brings together in a single environment the models corresponding to all the phenomena involved in material evolution (mechanics, physico-chemistry, thermodynamics, neutronics). In this context, the laboratory contributes to the calculation of material properties used as input parameters for the platform, based on a multiscale approach coordinating atomistic calculations up to larger scale simulations.

This work environment, where physicists, computer scientists and digital experts closely collaborate, is an excellent opportunity to discover a wide range of professions in numerical physics and computer science. Moreover, this internship is an opportunity to see for yourself how microscopic computational approaches ultimately help to solve complex practical problems.

### Références :

[1] Bareigts et al. « Molecular dynamics modeling of thermodiffusion in solids with charged defects using uranium dioxide as the case study ». *Chemical Engineering Science* 281 (2023): 119141. [doi.org/10.1016/j.ces.2023.119141](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119141).

[2] Konarski et al. *Journal of Nuclear Materials* 519:104, 2019

### ■ Formation souhaitée :

Master's degree or equivalent in solid state physics, modelling or numerical physics

### ■ Durée du stage :

6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Molecular Dynamics code LAMMPS

### ■ Mots clés :

Numerical, Statistical Physics, Molecular Dynamics

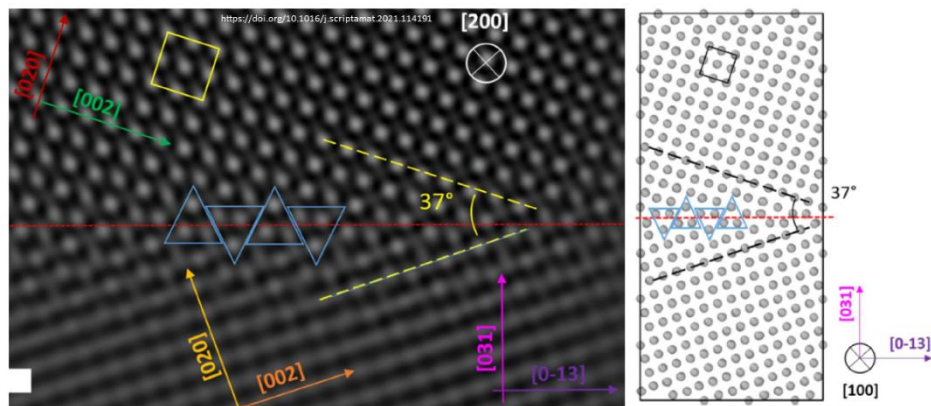
### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

MAILLARD Serge  
serge.maillard@cea.fr





# Modélisation en dynamique moléculaire et potentiels *machine learning* de la diffusion des gaz de fission dans les combustibles nucléaires

DEC/SESC/LM2C

Ce stage propose de simuler la diffusion à l'échelle atomique des gaz de fission dans les combustibles nucléaires pour calculer les paramètres qui alimentent les modèles de comportement à l'échelle micro- et macroscopique. Des nouveaux potentiels interatomiques de type *machine learning* offrent une précision accrue, permettant une caractérisation plus fidèle des propriétés complexes des matériaux qui sont ensuite transmises aux échelles de modélisation supérieures.

## Contexte

Les combustibles nucléaires, tels que l'oxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) et les oxydes mixtes d'actinides, sont essentiels au bon fonctionnement des réacteurs nucléaires. Une compréhension approfondie de leur comportement est primordiale pour optimiser la sécurité et l'efficacité des installations nucléaires actuelles et futures.

Un point important à considérer est la génération de gaz de fission au sein de la structure solide du combustible. Ces gaz, à faible solubilité, engendrent la formation de bulles nanométriques. Ce réseau de bulles à l'échelle des grains influence de manière significative les propriétés physiques du combustible. La simulation numérique multiéchelle joue un rôle complémentaire à la caractérisation expérimentale, en permettant de comprendre les phénomènes sous-jacents l'évolution des propriétés physiques et structurales, et de prendre en compte l'impact des hétérogénéités de la microstructure, telles que les joints de grain ou les dislocations.

## Objectifs du stage

Le/la candidat-e contribuera à la modélisation de la diffusion des gaz de fission à l'échelle de la microstructure des combustibles. Il/elle obtiendra des coefficients de diffusion qui alimenteront les modèles de comportement du combustible basés entre autre sur la méthode du champ de phase, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la dynamique des gaz de fission.

## Les missions

- Prendre en main les outils de simulation de dynamique moléculaire

(DM) et les potentiels interatomiques *machine learning* (ML) développés au laboratoire.

- Réaliser des simulations DM de diffusion des gaz de fission intra-grain et le long des joints de grain, en utilisant un potentiel ML et un potentiel empirique.
- Analyser les résultats des simulations et comparer les coefficients de diffusion obtenus entre les deux potentiels et avec la littérature.
- Collaborer avec l'équipe pour implémenter les coefficients de diffusion obtenus dans les codes de champ de phase.

## Compétences à acquérir

- Expertise en dynamique moléculaire et utilisation de potentiels ML.
- Compréhension approfondie des mécanismes de diffusion des gaz de fission dans les combustibles.
- Capacité à analyser critiquelement les résultats de simulations et à les intégrer dans des modèles mésoscopiques.
- Développement d'une approche scientifique rigoureuse appliquée à des enjeux énergétiques et environnementaux majeurs.

Ce stage offre l'opportunité de contribuer à l'avancement des connaissances sur le comportement des combustibles nucléaires, tout en développant une expertise dans la réalisation et la gestion de simulations numériques complexes en physique des matériaux sur des supercalculateurs.

## Formation souhaitée :

Physique du solide  
Physique numérique  
Science des matériaux

## Durée du stage :

6 mois (stage de fin d'études)

## Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire, potentiels interatomiques, LAMMPS

## Mots clés :

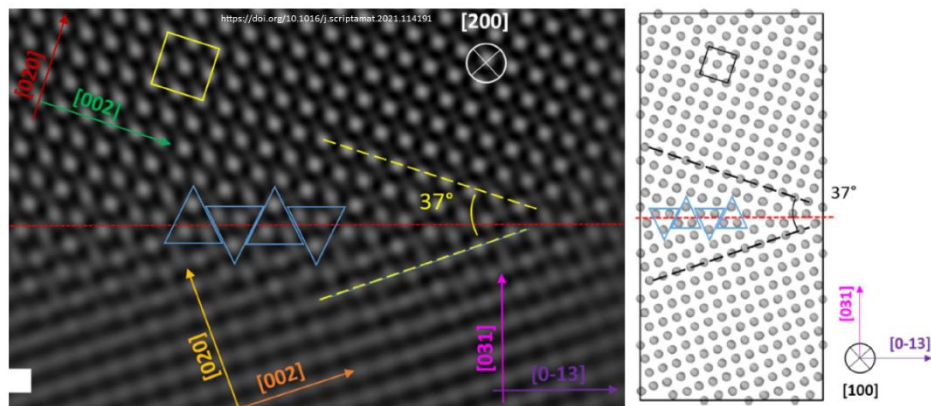
Combustibles nucléaires, Simulations numériques, Machine learning, Échelle atomique

## Possibilité de thèse :

Oui

## Contact :

MESSINA Luca  
luca.messina@cea.fr



# Modeling fission gas diffusion in nuclear fuels using molecular dynamics and machine learning potentials

DEC/SESC/LM2C

The goal of this internship is to simulate fission gas diffusion in nuclear fuels at the atomic scale, with the aim of calculating necessary input parameters for micro- and macroscopic behavior models. Newly developed machine learning interatomic potentials allow for a more accurate characterization of complex material properties, which are then incorporated into higher-scale modeling approaches.

## Context

Nuclear fuels, such as uranium oxide ( $\text{UO}_2$ ) and mixed-actinide oxides, are essential for the proper functioning of nuclear reactors. A thorough understanding of their behavior is crucial for optimizing the safety and efficiency of both current and future nuclear facilities.

A key aspect is the generation of fission gases within the fuel solid structure. These gases, with low solubility, lead to the formation of nanometric bubbles. The resulting network of bubbles at the grain scale significantly influences the physical properties of the fuel. Multi-scale computational modeling plays a complementary role to experimental characterization by enabling a deeper understanding of the phenomena underlying the evolution of physical and structural properties. It also allows for the consideration of microstructural heterogeneities, such as grain boundaries or dislocations, and their impact on fuel behavior.

## Internship objectives

The candidate will contribute to modeling fission gas diffusion in nuclear fuels at the microstructure scale. They will obtain diffusion coefficients to be fed into fuel behavior models based on the phase-field method. This work will contribute to a better understanding of fission gas dynamics in nuclear fuels.

## Tasks

- Learn to use molecular dynamics (MD) simulation tools and machine learning (ML) interatomic potentials developed in our lab.
- Perform MD simulations of fission gas diffusion within grains and along grain boundaries, using both ML and empirical potentials.
- Analyze simulation results and compare the obtained diffusion coefficients between the two potentials and with literature data.
- Collaborate with our team to implement the obtained diffusion coefficients into phase field codes.

## What you'll learn

- Expertise in molecular dynamics and the use of ML potentials.
- In-depth understanding of fission gas diffusion mechanisms in nuclear fuels.
- Ability to critically analyze simulation results and integrate them into mesoscopic models.
- Development of a rigorous scientific approach applied to major energy and environmental challenges.

This internship offers the opportunity to contribute to advancing knowledge on nuclear fuel behavior, while developing expertise in conducting and managing complex numerical simulations in materials physics using supercomputers.

## Formation souhaitée :

Solid State Physics  
Computational Physics  
Materials Science

## Durée du stage :

6 months (Master's thesis)

## Méthode/logiciel(s):

Molecular dynamics, interatomic potentials, LAMMPS

## Mots clés :

Nuclear fuels, Fission gases, Computational Materials, Machine Learning

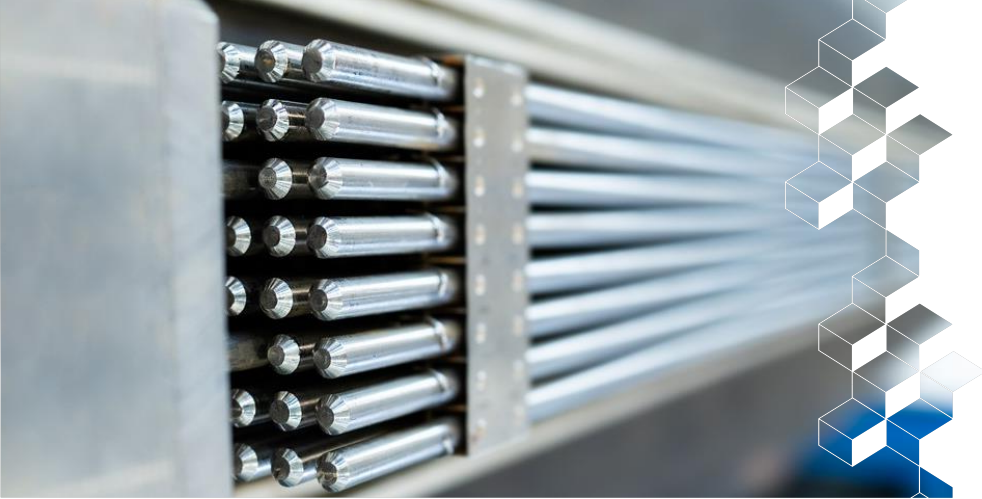
## Possibilité de thèse :

Yes

## Contact :

MESSINA Luca  
luca.messina@cea.fr





# Thermochimie des Produits de Fission en situation d'accidents graves de réacteurs nucléaire : composés à base de césium

DEC/SESC/LM2C

**Ce stage, au sein du Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles, s'inscrit dans le cadre d'une étude visant à proposer de nouveaux combustibles nucléaires innovants. Ce travail se concentrera sur l'identification de composés permettant la rétention des produits de fission à haute température.**

L'un des enseignements majeurs issus des trois accidents graves, c'est-à-dire avec fusion partielle ou totale du cœur du réacteur nucléaire, survenus à travers le monde à ce jour, en terme de conséquences radiologiques pour les populations et l'environnement, a trait au relâchement du césium hors du site nucléaire et à sa dispersion atmosphérique puis terrestre prononcée. Ceci est en grande partie dû à la très grande volatilité des Produits de Fission (PF) à base de césium impliqués et à la période radioactive longue des isotopes considérés (30,17 ans pour le  $^{137}\text{Cs}$  et 2.07 ans pour le  $^{134}\text{Cs}$ ).

L'une des pistes prometteuses pour lutter efficacement contre cet état de fait est d'imaginer des combustibles plus résistants aux accidents graves, appelés génériquement combustibles ATF (pour Accident Tolerant Fuel). Parmi les différentes voies possibles (dopage de la gaine, du combustible, microstructure avancée, ...) nous nous intéressons actuellement, au département d'étude du combustible du CEA Cadarache, aux possibilités offertes par la formation in situ (i.e. au sein de la matrice oxyde  $\text{UO}_2$  ou  $(\text{U,Pu})\text{O}_2$  du combustible) de composés piégeant le césium.

Le sujet de stage proposé s'intègre dans ce cadre général. Dans un premier temps, une étude

bibliographique devra être effectuée afin d'identifier des composés permettant la rétention des PF à haute température. Sur la base de ces résultats, une approche théorique reposant sur des calculs thermochimiques, utilisant la méthode CALPHAD, sera réalisée pour évaluer les candidats identifiés. Enfin, l'étudiant(e) pourra proposer des méthodes permettant, à l'échelle du laboratoire, de synthétiser les combustibles innovant correspondant.

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Calculs thermochimiques (FactSage et Thermo-Calc)

## ■ Mots clés :

matériaux nucléaires, combustibles innovants, méthode CALPHAD

## ■ Possibilité de thèse :

non

## ■ Contact :

ROCHEDY Morgane  
Morgane.rochedy@cea.fr





## Thermochemistry of fission products in severe nuclear reactor accidents: caesium-based compounds

DEC/SESC/LM2C

**This internship is part of a study aimed at proposing new innovative nuclear fuels. The work will focus on identifying compounds that retain fission products at high temperatures.**

One of the major lessons learned from the three severe accidents worldwide to date, involving partial or total meltdown of the nuclear reactor core, in terms of radiological consequences for people and the environment, concerns the release of cesium from the nuclear site and its pronounced atmospheric and terrestrial dispersion. This is largely due to the very high volatility of the cesium-based fission products (FPs) involved and the long half-life of the isotopes in question (30.17 years for  $^{137}\text{Cs}$  and 2.07 years for  $^{134}\text{Cs}$ ).

One promising approach to effectively addressing this situation is to develop fuels that are more resilient to severe accidents, commonly referred to as ATF (Accident Tolerant Fuel). Among the various possible approaches (cladding doping, fuel doping, advanced microstructures, etc.), the Fuel Design Department at CEA Cadarache is currently exploring the possibilities offered by the in situ formation (i.e., within the  $\text{UO}_2$  or  $(\text{U,Pu})\text{O}_2$  oxide matrix of the fuel) of cesium-trapping compounds.

The proposed internship falls within this general framework. Initially, a bibliographical study will be carried out to identify compounds capable of retaining FPs at high temperatures. On the basis of these results, a theoretical approach based on

thermochemical calculations, using the CALPHAD method, will be carried out to evaluate the identified candidates. Finally, the student will be able to propose laboratory-scale methods for synthesizing the corresponding innovative fuels.

### ■ Formation souhaitée :

Engineering school, Master's degree in physico-chemistry or materials science

### ■ Durée du stage :

4 or 6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Thermochemical calculation (FactSage and Thermo-Calc)

### ■ Mots clés :

nuclear materials, innovative fuels, CALPHAD method

### ■ Possibilité de thèse :

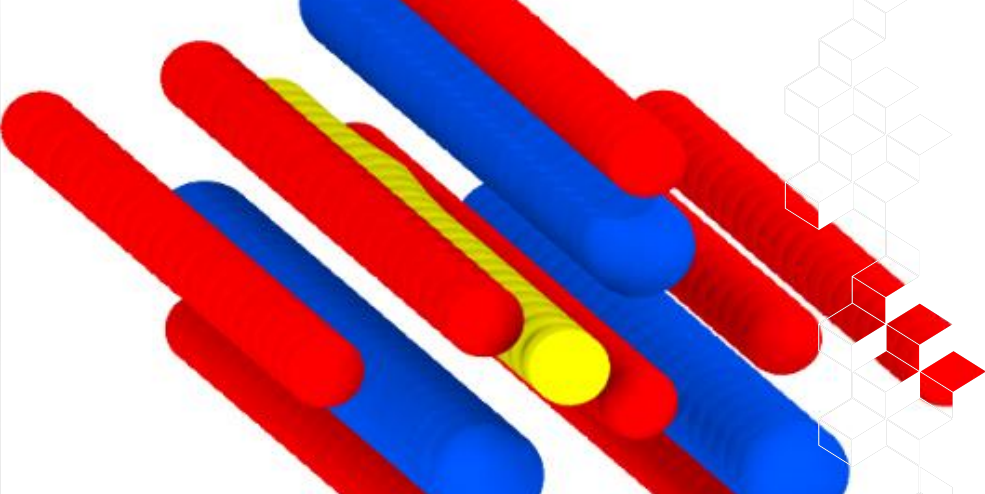
no

### ■ Contact :

Morgane ROCHEDY

Morgane.rochedy@cea.fr





# Détermination à l'échelle atomique des lois de mobilité des dislocations dans l' $\text{UO}_2$

DEC/SESC/LM2C

Le dioxyde d'uranium  $\text{UO}_2$  est le combustible nucléaire de référence dans les réacteurs à eau pressurisée (REP). La connaissance du comportement mécanique de ce combustible nucléaire polycristallin couplé aux effets d'irradiation est un enjeu important de sûreté nucléaire. Dans ce cadre, pouvoir évaluer les contraintes et déformations s'exerçant dans les grains du polycristal et à leurs interfaces est un objectif important. Cela passe par la compréhension des phénomènes mis en jeu de l'échelle atomique à celle des hétérogénéités microstructurales du combustible.

## Objectifs:

L'objectif principal de ce stage est d'étudier par des simulations à l'échelle atomique la mobilité des dislocations, qui sont le moteur du comportement mécanique, dans le combustible nucléaire  $\text{UO}_2$ . Ces calculs aux petites échelles alimenteront un modèle de plasticité permettant de simuler des expériences de compression par la méthode des éléments finis.

En s'appuyant sur une méthodologie développée au laboratoire, la première étape de ce projet sera de déterminer les lois de vitesses des **dislocations coins** dans  $\text{UO}_2$  en fonction de la température, de la contrainte appliquée et de l'orientation du cristal. La seconde étape sera dédiée à la modélisation de ces lois à partir d'expressions analytiques permettant d'obtenir des paramètres clés dans une approche de simulation multiéchelle. Les résultats seront ensuite comparés à ceux existants pour le combustible  $\text{UO}_2$ .

## Étapes du stage:

Le ou la stagiaire débutera le stage par une phase d'étude bibliographique pour s'imprégner d'une part du contexte autour du combustible nucléaire et d'autre part de la physique sous-jacente au sujet de stage : physique de l'état solide, plasticité cristalline, dynamique des dislocations. En parallèle de la bibliographique, une étape de prise en main des outils de calculs sera réalisée (environnement Linux, supercalculateurs du TGCC, code LAMMPS, logiciel de post-traitement OVITO). Enfin, le ou la stagiaire rentrera dans une phase de production et analyse des résultats de simulation.

## Environnement de travail:

Le ou la stagiaire sera accueilli(e) au sein du Laboratoire de Modélisation du Comportement des Combustibles situé sur le site de Cadarache. Ce laboratoire très dynamique, spécialisé dans la modélisation des propriétés fondamentales et du comportement des combustibles nucléaires, est composé de 11 chercheurs permanents et autant d'étudiants en thèse. Le centre de Cadarache est situé en Provence, entre les parcs naturels du Verdon et du Lubéron, offrant un cadre de travail très agréable. Le CEA met à disposition des salariés des lignes de bus gratuites permettant de rejoindre le centre depuis les principales villes alentours (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis...). Le ou la stagiaire aura également la possibilité de faire du télétravail après une période d'acclimatation au sein de l'équipe.

## ■ Formation souhaitée :

Master 2

## ■ Durée du stage :

5 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire /  
LAMMPS / OVITO /  
Environnement Linux

## ■ Mots clés :

Combustibles nucléaires,  
plasticité cristalline, dislocations,  
dynamique moléculaire

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

PIVANO Adrien

[adrien.pivano@cea.fr](mailto:adrien.pivano@cea.fr)





# Atomic-scale determination of dislocation mobility laws in UO<sub>2</sub>

DEC/SESC/LM2C

Uranium dioxide UO<sub>2</sub> is the reference nuclear fuel in pressurized water reactors (PWRs). Understanding the mechanical behavior of this polycrystalline nuclear fuel coupled with irradiation effects is a significant safety concern in nuclear engineering. In this context, being able to assess the stresses and deformations occurring within the grains of the polycrystal and at their interfaces is an important objective. This involves understanding the phenomena at play from the atomic scale to the microstructural heterogeneities of the fuel

## Objectives:

The main objective of this internship is to study the mobility of dislocations, which are the drivers of mechanical behavior in nuclear fuel UO<sub>2</sub>, through atomic-scale simulations. These small-scale calculations will feed into a plasticity model for simulating compression experiments using the finite element method.

Building upon a methodology developed in the laboratory, the first step of this project will involve determining the velocity laws of edge dislocations in UO<sub>2</sub> as a function of temperature, applied stress and crystal orientations. The second step will be dedicated to the modelling of these law using analytical expression which provide key parameter for the upscaling process. Then, the results will be compared to those existing for UO<sub>2</sub> fuel.

## Stages of the internship:

The intern will begin the internship with a literature review phase to gain a comprehensive understanding of both the context surrounding nuclear fuel and the underlying physics related to the topic of the internship, including solid-state physics, crystal plasticity, and dislocation dynamics. Concurrently with the literature review, there will be a hands-on phase to become familiar with computational tools (Linux environment, TGCC supercomputers, LAMMPS code, OVITO post-processing software). Finally, the intern will transition into a phase of production and analysis of simulation results.

## Work environment:

The intern will be welcomed within the Fuel Behavior Modeling Laboratory located at the Cadarache site. This highly dynamic laboratory specializes in modeling the fundamental properties and behavior of nuclear fuels and consists of 11 permanent researchers and an equal number of doctoral students. The Cadarache center is located in Provence, between the natural parks of Verdon and Lubéron, offering a very pleasant working environment. CEA provides employees with free bus lines to the main nearby cities (Manosque, Aix-en-Provence, Pertuis, etc.). The intern will also have the opportunity to work remotely after an acclimatization period with the team

### ■ Formation souhaitée :

Master 2

### ■ Durée du stage :

5 to 6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Molecular dynamics / LAMMPS / OVITO / Linux environment

### ■ Mots clés :

Nuclear fuel, cristal plasticity, dislocations, molecular dynamics

### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

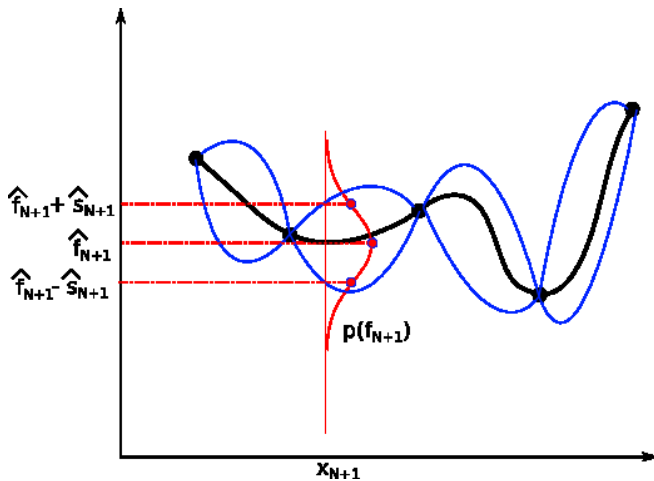
PIVANO Adrien

[adrien.pivano@cea.fr](mailto:adrien.pivano@cea.fr)



# Modèle multi-fidélité pour la description des propriétés thermophysiques d'oxydes mixtes d'actinides

DEC/SESC/LM2C



Les outils de calcul scientifique permettant de simuler le comportement thermomécanique et physico-chimique du combustible en réacteur se basent sur des lois de comportement des propriétés des matériaux issues de mesures expérimentales qui sont difficiles à obtenir, ce qui peut parfois entraîner un manque de précision. L'objectif de ce stage est de proposer des lois de comportement plus précises à l'aide de l'apprentissage automatique et d'un modèle multi-fidélité.

Pour bien maîtriser la conception, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à neutrons rapides (génération IV), il est essentiel d'avoir une connaissance précise des propriétés du combustible d'oxydes mixtes d'actinides (MOx). Plusieurs propriétés thermophysiques peuvent être calculées à l'échelle atomique avec des méthodes dites du premier principe, qui reposent sur la physique quantique et ne nécessitent pratiquement aucune autre donnée d'entrée que la structure atomique d'un matériau. C'est par exemple le cas de la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT), une méthode haute fidélité mais dont le coût en temps de calculs ne permet pas de produire beaucoup de données. Alternativement, la dynamique moléculaire classique (DMC) est une méthode basée sur la simulation numérique du mouvement des atomes et des molécules dans un système, utilisant des champs de force classiques pour modéliser les interactions interatomiques. Cette méthode, bien que moins fidèle que la DFT, est moins coûteuse en temps et peut ainsi être utilisée pour établir des lois de comportement des propriétés thermophysiques.

L'objectif de ce stage est de combiner ces méthodes (DFT et DMC) entre elles et avec des données expérimentales à l'aide des

approches d'apprentissage statistique pour proposer des lois de comportement de MOx plus précises. Des approches d'apprentissage statistique (*machine learning*) de type multi-fidélité pourraient apporter une solution pertinente pour intégrer simultanément les résultats expérimentaux et ceux simulés par les méthodes DFT et DMC, tout en tenant compte du degré de confiance différent attribué à chaque type de résultat et de la quantité de données disponibles. Le-la candidat-e utilisera des méthodes DFT et DMC pour calculer des propriétés thermophysiques de MOx et effectuera les premiers pas pour entraîner un modèle multifidélité.

Le-la candidat-e utilisera les outils à la pointe de la simulation numérique des matériaux, ainsi que les supercalculateurs du complexe de calcul scientifique du CEA. Il-elle rejoindra une équipe de recherche très dynamique, spécialisée dans la simulation multiéchelle des combustibles nucléaires qui accueille chaque année de nombreux stagiaires de nationalités différentes.

## ■ Formation souhaitée :

Physique numérique  
Physico-chimie du solide  
Science des matériaux  
Mathématiques pour physique

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Dynamique moléculaire  
Python

## ■ Mots clés :

Intelligence Artificielle,  
Combustibles Nucléaires,  
Simulations Numériques

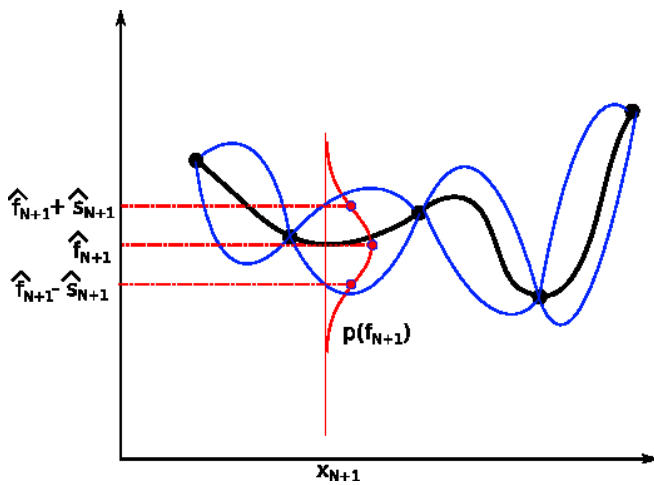
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

ROMANOVA Mariya  
mariya.romanova@cea.fr





## Multi-fidelity model for the description of the thermophysical properties of mixed actinide oxides.

DEC/SESC/LM2C

Scientific computing tools used to simulate the thermomechanical and physicochemical behavior of reactor fuel are based on material property behavior laws derived from experimental measurements, which are difficult to obtain and can sometimes result in a lack of precision. The objective of this internship is to propose more accurate behavior laws using machine learning and a multi-fidelity model.

To properly master the design, operation, and safety of fast neutron reactors (Generation IV), it is essential to have an accurate understanding of the properties of mixed actinide oxide fuels (MOx). Several thermophysical properties can be calculated at the atomic scale using so-called first-principles methods, which are based on quantum physics and require practically no other input data than the atomic structure of a material. One example is Density Functional Theory (DFT), a high-fidelity method, but whose computational time cost does not allow the production of a large amount of data. Alternatively, classical molecular dynamics (CMD) is a method based on the numerical simulation of the movement of atoms and molecules in a system, using classical force fields to model interatomic interactions. Although this method is less accurate than DFT, it is less time-consuming and can thus be used to establish laws governing thermophysical properties.

solution to simultaneously integrate experimental results and those simulated by DFT and CMD methods, taking into account the different degrees of confidence attributed to each type of result and the amount of data available. The candidate will use DFT and CMD methods to calculate the thermophysical properties of MOx and take the first steps toward training a multi-fidelity model.

The candidate will use state-of-the-art material simulation tools and the supercomputers of the CEA scientific computing complex. They will join a very dynamic research team specializing in multiscale simulation of nuclear fuels, which welcomes many trainees of different nationalities each year.

The objective of this internship is to combine these methods (DFT and CMD) with each other and with experimental data using statistical learning approaches to propose more accurate behavior laws for MOx. Multi-fidelity machine learning approaches could provide a relevant

■ Formation souhaitée :

■ Durée du stage :

6 months

■ Méthode/logiciel(s):

Molecular dynamics

Python

■ Mots clés :

Artificial Intelligence,  
Nuclear Fuels,  
Numerical Simulations

■ Possibilité de thèse :

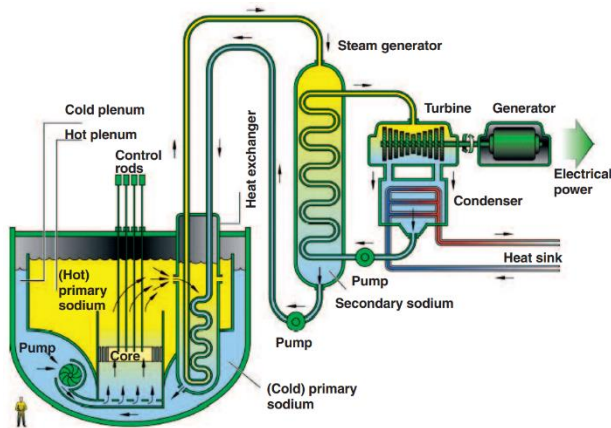
Yes

■ Contact :

ROMANOVA Mariya

mariya.romanova@cea.fr





# Contribution aux études de sûreté des réacteurs à neutrons rapides à l'aide d'outils de calcul à l'échelle des atomes

DEC/SESC/LM2C

Ce stage se situe au cœur d'une thématique concernant l'étude des scénarios d'accidents dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides. Le stagiaire devra mener une étude à l'échelle atomique visant à calculer des propriétés thermophysiques de mélanges représentatifs de coriums prototypiques. Plus particulièrement, il s'agira d'étudier des mélanges liquides constitués principalement d'uranium et de fer, et en visant le calcul de propriétés telles que la densité ou la viscosité. Afin de calculer ces propriétés, le stagiaire devra effectuer des calculs *ab initio* et de dynamique moléculaire classique, ainsi qu'utiliser des outils de calcul basés sur des méthodes de machine-learning.

## Bibliographie:

Les oxydes mixtes d'uranium-plutonium ( $(U,Pu)O_2$ ) mis sous la forme de pastilles sont communément considérées comme combustible nucléaire dans les concepts de réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium. Ce matériau présente une haute température de fusion, ce qui le rend particulièrement sûr.

Des études de sûreté explorent cependant les risques de perte de réfrigérant primaire dans ce type de réacteur. Dans ces conditions, une fonte partielle d'éléments de combustible peut avoir lieu. Ceci peut conduire à la fonte de la gaine en acier entourant le combustible, et entraîner la formation de mélanges liquides que l'on dénomme **coriums**. L'analyse de l'évolution en cuve de ces mélanges liquides est cruciale pour améliorer notre compréhension des étapes préliminaires des scénarios d'accident.

## Objectifs:

L'amélioration de nos connaissances des propriétés de coriums liquides est d'importance fondamentale. En effet, les simulations à grande-échelle de scénarios d'accident reposent largement sur une connaissance précise de certaines de ces propriétés, telles que la densité, la compressibilité, la chaleur-spécifique ou la viscosité. Des mesures expérimentales de certaines de ces propriétés sont en cours au CEA, mais restent complexes et coûteuses. Durant ce stage, l'objectif sera de coupler différentes méthodes de calculs à l'échelle des atomes afin d'effectuer des calculs *ab initio* de propriétés thermophysiques de mélanges représentatifs de coriums, et de comparer ces résultats aux données expérimentales existantes.

## Principales étapes du stage:

Une analyse bibliographique des études expérimentales et numériques précédemment publiées sur le sujet sera réalisée. Une attention particulière devra être portée aux études atomistiques pertinentes pour ce sujet. Les résultats expérimentaux précédemment publiés pourront être utilisés comme données de référence pour la validation des calculs *ab initio*.

Il s'agira ensuite de s'approprier les codes de simulations atomistiques utilisés au laboratoire. En particulier, les codes ABINIT

et LAMMPS, utilisés respectivement pour la simulation *ab initio* en théorie de la fonctionnelle de la densité, et la dynamique moléculaire classique. L'étudiant devra enfin effectuer quelques calculs préliminaires à l'aide de la méthode "Machine-Learning Assisted Canonical Sampling" (MLACS) [1].

Des premiers calculs de propriétés pourront être effectués sur l'uranium et le fer liquides. Pour ces deux compositions, quelques données expérimentales existent, ce qui nous permettra de valider notre approche *ab initio*.

Une étude des propriétés de coriums prototypiques, tels que des mélanges U-Fe ou U-Fe-Ni en fonction de la composition et température des mélanges, pourra ensuite être menée. Les propriétés visées incluent la densité, la chaleur spécifique, la viscosité, ainsi qu'une analyse de la structure du liquide.

Enfin, des bases de données et des lois de comportement seront tirées des propriétés calculées. Le stagiaire sera alors en charge du transfert de ces données vers d'autres groupes de recherche du CEA, spécialisés dans la simulation à plus grande échelle ou le calcul de diagrammes de phase.

## Contexte et collaborations:

Le stagiaire sera accueilli au sein d'un laboratoire de recherche très dynamique spécialisé dans l'étude multiéchelle des combustibles nucléaires, sur le centre de Cadarache. Il travaillera en étroite collaboration avec un doctorant du laboratoire. Il aura aussi l'opportunité d'interagir et collaborer avec des chercheurs d'autres départements du CEA, spécialisés dans la simulation et l'analyse des scénarios d'accidents nucléaires.

[1] Castellano, A., Bottin, F., Bouchet, J., Levitt, A., & Stoltz, G. (2022). *Ab initio* canonical sampling based on variational inference. *Physical Review B*, 106(16), L161110.

## Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou master en science des matériaux, physique de l'état solide, physique numérique.

## Durée du stage :

6 mois

## Méthode/logiciel(s):

LAMMPS, ABINIT

## Mots clés :

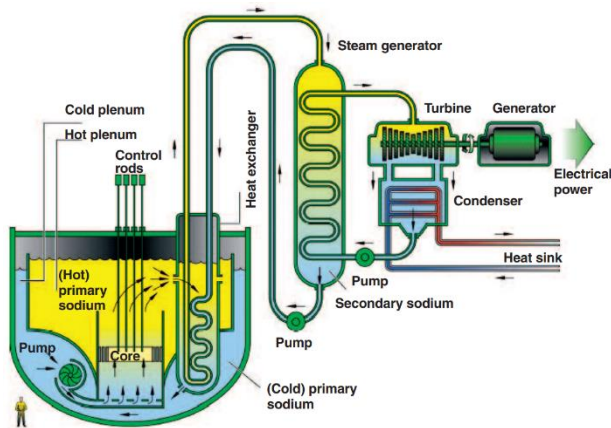
Combustibles nucléaires, Science des matériaux, Physique de l'état solide

## Possibilité de thèse :

Oui

## Contact :

TRANCHIDA Julien  
julien.tranchida@cea.fr



# Contribution to the nuclear safety investigations in fast-neutron reactors by means of atomistic-scale computations

DEC/SESC/LM2C

The context of this internship is the simulation of nuclear accident scenarios in fast-neutron reactors. The intern will conduct an atomic scale investigation of the liquid properties of mixtures representative of prototypical coriums. More particularly, the intern will focus on liquid mixtures based on uranium and iron, and properties such as the density, heat-capacity, and viscosity. To perform those computations, the intern will leverage *ab initio* simulations and classical molecular dynamics, as well as machine-learning computational tools.

## Bibliography:

Pellets of mixed uranium-plutonium dioxide ( $\text{U,PuO}_2$ ) are commonly considered as nuclear fuels in concepts of sodium-cooled fast-neutron reactors. Among other advantages, ( $\text{U,PuO}_2$ ) presents a high melting temperature, which increases its capacity to be safe and reliable.

Safety studies are exploring the low probability events of a loss of primary coolant in the core of fast-neutron reactors. Under those conditions, a partial melting of the fuel pellets can occur. The formation of this high-temperature liquid fuel can melt the steel-based cladding, and form liquid mixtures referred to as **coriums**. Investigating the in-vessel evolution of this liquid mixtures is of crucial importance to understand the early stages of nuclear accident scenarios.

## Objectives:

It is of fundamental importance to improve our knowledge of the properties of liquid coriums. Indeed, large-scale simulations of nuclear accident scenarios largely rely on some of those properties, such as the density, compressibility, heat-capacity and viscosity of those mixtures as a function of their temperature and composition. Ongoing experimental studies at CEA aim at measuring some of those properties, but remain complex and expensive. Within this computational internship, the goal is to couple different atomistic methodologies in order to perform *ab initio* computations of thermophysical properties of coriums, and to compare them to existing experimental data.

## Main steps of the internship:

- Bibliography analysis on previous experimental and numerical investigations of coriums. Previous atomistic investigations of mixtures relevant for this study will have to be analyzed with care. Published experimental results will provide the intern with reference data on which the atomistic results will have to be compared.
- Becoming familiar with the atomistic simulation codes used at the laboratory. In particular ABINIT and LAMMPS, respectively for the *ab initio* density functional theory, and the classical molecular dynamics calculations. Running some initial calculations with the

"Machine-Learning Assisted Canonical Sampling" (MLACS) atomistic tool [1].

- Performing some initial computations on liquid uranium and liquid iron (on which experimental data is available) to probe the validity of the *ab initio* computations.
- Investigation of prototypical corium compositions, such as U-Fe and U-Fe-Ni as a function of temperature and molar fraction of the different species. The targeted properties will include the evolution of the density and viscosity, as well as an analysis of the structure of the liquid.
- Construction of datasets and constitutive laws based on the computed properties. The intern will be in charge of transferring those laws to the CEA researchers working on larger scale simulations or phase-diagram computations.

## 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 a PhD student at the laboratory. Besides, he will have to interact with experimental and computation researchers from other CEA departments, specialized in the simulation and analysis of nuclear accident scenarios.

[1] Castellano, A., Bottin, F., Bouchet, J., Levitt, A., & Stoltz, G. (2022). *Ab initio* canonical sampling based on variational inference. *Physical Review B*, 106(16), L161110.

## Formation souhaitée :

Engineering school or masters degree in materials science, solid state physics, or computational physics

## Durée du stage :

6 months

## Méthode/logiciel(s):

LAMMPS, ABINIT

## Mots clés :

Nuclear fuels, Materials science, Solid state physics.

## Possibilité de thèse :

Yes

## Contact :

Julien Tranchida

julien.tranchida@cea.fr





# Etude à l'échelle atomique du combustible nucléaire métallique UMo: travaux préliminaires dans le contexte des réacteurs de recherche

DEC/SESC/LM2C

**Le stagiaire sera en charge de conduire une étude à l'échelle atomique du combustible métallique uranium-molybdène monolithique (UMo mono). UMo est considéré comme un combustible candidat pour les réacteurs de recherche. L'influence de l'irradiation ainsi que de la température sur des propriétés thermophysiques du combustible, comme sa conductivité thermique, seront analysés à l'aide de calculs à l'échelle atomique et comparés aux données expérimentales existantes.**

## Bibliographie:

Les combustibles céramiques, tel que le dioxyde d'uranium  $UO_2$ , sont actuellement les combustibles de choix au sein des réacteurs à eau pressurisée (REP). Ils présentent une bonne stabilité sous irradiation ainsi qu'une température de fusion élevée, ce qui les rends sûrs. Cependant, leur conductivité thermique est faible, ce qui entraîne de forts gradients de température au sein des pastilles de combustible.

D'autres types de combustibles sont considérés afin d'améliorer ces propriétés thermiques. C'est par exemple le cas des combustibles métalliques tel que les alliages d'uranium-molybdène UMo. L'UMo présente un point de fusion plus faible, mais une conductivité thermique bien plus élevée. De plus, l'UMo monolithique est considéré comme l'un des potentiels combustibles candidats pour les réacteurs de recherche. Il est donc crucial de développer de nouveaux modèles de calcul permettant d'analyser l'évolution des propriétés thermomécaniques et de la densité d'uranium de l'UMo sous irradiation. Il s'agit de deux objectifs de ce stage.

## Objectives:

L'objectif principal de ce stage est d'explorer et de comparer différents outils de calculs à l'échelle des atomes disponibles pour l'étude des alliages d'UMo. En particulier, le stagiaire se concentrera sur le calcul de propriétés de l'UMo cruciales dans le contexte des combustibles nucléaires, telles que la conductivité thermique, les propriétés mécaniques, ou la stabilité et la diffusion de défauts dans le matériau. Les résultats produits par le stagiaire seront mis sous la forme de lois de comportement qui pourront être utilisées au sein de code de simulation à grande échelle.

## Etapes du stage:

- Analyse bibliographique des expériences et calculs précédemment menés sur l'UMo. Il s'agit en particulier d'analyser

les calculs à l'échelle atomique déjà publiés. Les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature serviront de données de référence pour comparaison aux résultats des calculs atomistiques.

- Le stagiaire devra ensuite se familiariser aux codes de simulation à l'échelle atomique utilisés au laboratoire, en particulier les codes ABINIT et LAMMPS, respectivement utilisés pour les calculs *ab initio* et les calculs en dynamique moléculaire classique.
- Il s'agira ensuite de tester les potentiels interatomiques disponibles dans la littérature pour l'UMo. Ces tests nécessiteront d'effectuer des calculs *ab initio* afin d'en utiliser les résultats comme données référence.
- Enfin, le stagiaire s'attèlera au calcul des propriétés thermophysiques souhaitées (conductivité thermique, propriétés mécaniques) à l'aide de la dynamique moléculaire classique et des calculs *ab initio*. Les résultats obtenus seront analysés et comparés aux données expérimentales de la littérature.

## Contexte et collaborations:

Le stagiaire sera accueilli au sein d'un laboratoire de recherche très dynamique spécialisé dans l'étude multiéchelle des combustibles nucléaires, sur le centre de Cadarache, et aura l'opportunité de travailler en étroite collaboration avec plusieurs doctorants du laboratoire, ainsi qu'avec des chercheurs d'autres services du CEA.

## ■ Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur ou master en science des matériaux, physique de l'état solide, physique numérique.

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

LAMMPS, ABINIT

## ■ Mots clés :

Combustibles nucléaires,  
Science des matériaux,  
Physique de l'état solide

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

TRANCHIDA Julien  
julien.tranchida@cea.fr





# Atomistic investigation of the metallic nuclear fuel UMo: a preliminary study in the context of research reactors

DEC/SESC/LM2C

The intern will conduct an atomic scale investigation on a metallic nuclear fuel, monolithic uranium-molybdenum (UMo mono). UMo is considered as a potential nuclear fuel for research reactors. The influence of irradiation and temperature on some of the thermo-mechanical properties of the fuel, such as its thermal conductivity, will be analyzed leveraging atomistic simulation tools, and compared to existing experimental data.

## Bibliography:

Ceramic materials, such as uranium dioxide  $UO_2$  or mixed-oxides  $(U,Pu)O_2$ , are currently the nuclear fuel of choice for Pressurized-Water Reactors (PWRs). They are very stable under irradiation conditions and present a high melting temperature (approximately 3000 K), which makes them a safe choice. However, their thermal conductivity is very low, which is leading to large temperature gradients within the fuel pellets.

Other types of materials have been considered for improving those thermal properties. This is for example the case of metallic nuclear fuels, such as uranium – molybdenum alloys, UMo. UMo presents a lower melting point, but a much improved thermal conductivity. Besides, UMo is considered as a potential nuclear fuel candidate for research reactors.

It is therefore crucial to investigate the evolution of the thermo-mechanical properties (such as the thermal conductivity or the elastic properties), as well as the uranium density of UMo under irradiation. Those are objectives of this internship.

## Objectives:

The main objective of this internship is to explore and compare the atomistic simulation tools available for the simulation of UMo alloys. In particular, the intern will focus on the computation of some crucial properties of UMo, such as its mechanical behavior and thermal conductivity, and the stability and diffusion properties of some fundamental atomistic defects in the material. The results produced by the intern will be set in the form of constitutive laws, and transferred to larger-scale simulation codes.

## Main steps of the internship:

- Bibliography analysis on previous

experimental and numerical investigations of UMo. Previous atomistic investigations of this compound will have to be analyzed with care. Published experimental results will provide the intern with reference data on which the atomistic results will have to be compared.

- Becoming familiar with the atomistic simulation codes used at the laboratory. In particular ABINIT and LAMMPS, respectively for the *ab initio* density functional theory, and the classical molecular dynamics calculations.
- Testing the interatomic potentials available for UMo in the literature, and performing *ab initio* computations to use them as a reference and probe the validity of those results.
- Compute thermo-mechanical properties (thermal conductivity, mechanical properties) with both classical and *ab initio* tools compare and analyze the results with respect to available experimental data from the literature.

## 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 departments.

## ■ Formation souhaitée :

Engineering school or masters degree in materials science, solid state physics, or computational physics

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

LAMMPS, ABINIT

## ■ Mots clés :

Nuclear fuels, Materials science, Solid state physics.

## ■ Possibilité de thèse :

Yes

## ■ Contact :

Julien Tranchida

julien.tranchida@cea.fr





# Développement et Vérification du Code de Thermo- mécanique Manta pour la Simulation Multiphysiques 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 mécaniques.

Ce stage offrira une 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>

Master 2 en simulation  
mécanique des solides

3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur

6 mois

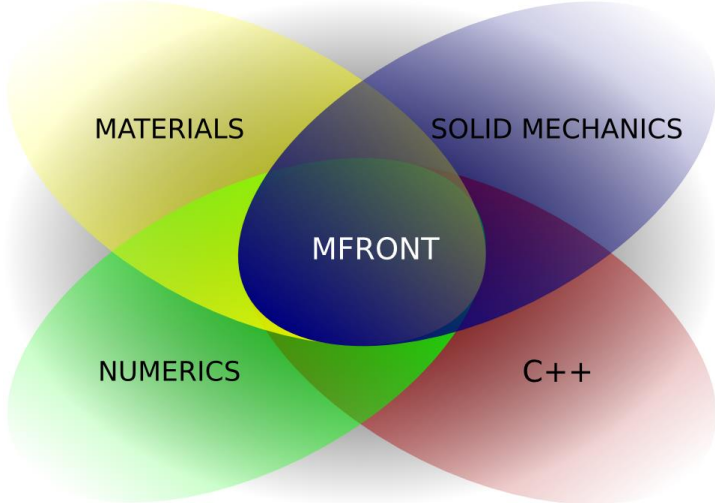
Manta, MFront, C++

Simulation numérique, éléments  
finis

Non

HELPER Thomas  
thomas.helfer@cea.fr





# Implémentation de lois de comportements mécaniques par différentiation automatique

DEC/SESC/LMCP

**L'objet de ce stage est d'évaluer la pertinence de la bibliothèque TFELMathEnzyme, basée sur le project 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 performances et de robustesse.**

Les lois de comportements mécaniques concentrent les connaissances acquises sur les matériaux et sont de fait fondamentales en mécanique de 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 différentier 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] 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] W. S. Moses *et al.*, Reverse-mode automatic differentiation and optimization of GPU kernels via enzyme, SC21 International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, pp. 1-18 (2021)

Master 2 en mathématiques appliquées ou en mécanique nonlinéaire des solides

3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur

6 mois

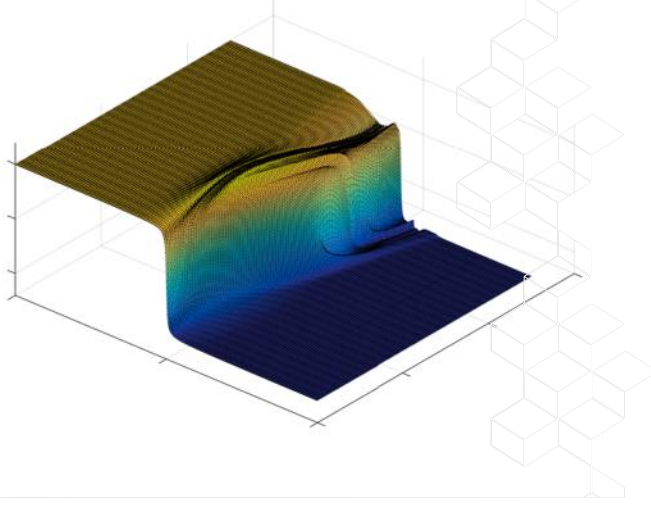
MFront, Manta

Différentiation automatique, Enzyme, C++

Oui

HELPER Thomas  
thomas.helfer@cea.fr





# Solveur Intégrodifférentiel HPC Parallèle pour la Dynamique des Dislocations

DEC/SESC/LMCP

**La compréhension du comportement des métaux à forts taux de déformation [1] (entre  $10^4$  et  $10^8 \text{ s}^{-1}$ ) représente un défi scientifique et technologique considérable. Leur déformation irréversible (plastique) est due à la présence de défauts linéaires d'alignement cristallin : les dislocations, qui interagissent via le champ élastique à longue portée et par interactions de contact**

Actuellement, le comportement des métaux aux taux de déformation les plus hauts ne sont accessibles expérimentalement que par choc laser. D'où la nécessité d'un outil de simulation. Deux grands types d'approches sont possibles à l'échelle mésoscopique d'un ensemble de dislocations : la dynamique moléculaire, et les simulations élastodynamiques. Cette thèse s'inscrit dans le second type d'approche, capitalisant sur nos travaux récents [2, 3] qui ont permis les premières simulations numériques de l'équation de Peierls-Nabarro Dynamique (PND) [4]. Celle-ci permet l'étude du phénomène en tenant compte de l'aspect retardé des interactions élastodynamiques entre dislocations (voir aussi [5] pour l'élastodynamique des fractures).

PND est une équation intégrodifférentielle non-linéaire qui présente une double difficulté : la non-localité en temps et en espace des opérateurs. Nous l'avons simulée pour la première fois grâce à une stratégie numérique efficace [2], issue de [6]. Mais la nature mono-processus de son implantation actuelle constitue un verrou, limitant fortement la taille du système et l'étude de son comportement en temps long.

**Sujet de stage :** Sur la base algorithmique développée dans [2], commencer l'implémentation d'un solveur HPC (Calcul Haute Performance) parallélisé en espace et en temps, avec mémoire

distribuée. Cette étape constitue le premier jalon de la thèse qui va suivre.

**Profil du candidat :** Le candidat devra posséder une solide formation en calcul scientifique appliqué aux équations aux dérivées partielles et un goût prononcé pour les applications physiques. La maîtrise du C++, avec des compétences en OpenMP et MPI seraient fortement appréciées. Des connaissances en mécanique des milieux continus seraient aussi vues comme un plus.

Le stage se déroulera au CEA/DES/ IRESNE/DEC à Cadarache.

[1] Remington et coll., Metall. Mat. Trans. A 35, 2587 (2004).

[2] Pellegrini, Josien, Shock-driven motion and self-organization of dislocations in the dynamical Peierls model, soumis.

[3] Josien, Etude mathématique et numérique de quelques modèles multi-échelles issus de la mécanique des matériaux. Thèse. (2018).

[4] Pellegrini, Phys. Rev. B, 81, 2, 024101, (2010).

[5] Geubelle, Rice. J. of the Mech. and Phys. of Sol., 43(11), 1791-1824. (1995).

[6] Lubich & Schädle. SIAM J. on Sci. Comp. 24(1), 161-182. (2002).

## ■ Formation souhaitée :

M2 de calcul scientifique/Analyse numérique/Physique

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

C++ avec OpenMP/MPI

## ■ Mots clés :

HPC, intégrodifférentiel, dislocations

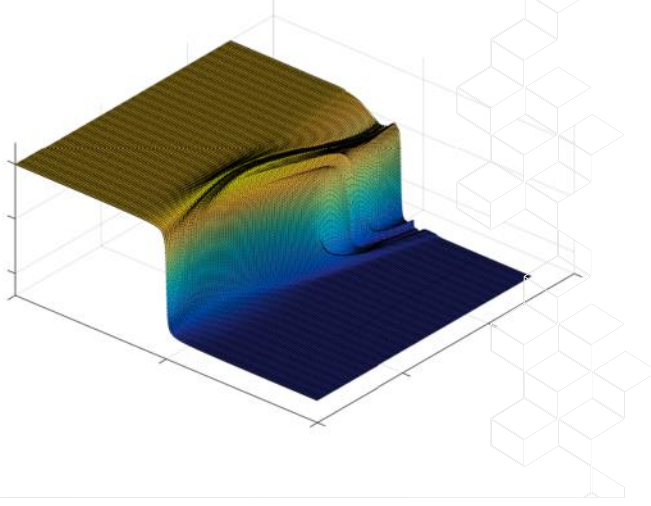
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

JOSIEN Marc  
marc.josien@cea.fr





# HPC Parallel Integrodifferential Solver for Dislocation Dynamics

DEC/SESC/LMCP

**Understanding the behavior of metals at high deformation rate [1] (between  $10^4$  and  $10^8 \text{ s}^{-1}$ ) is a huge scientific and technologic challenge. Their irreversible (plastic) deformation is caused by linear defects in the crystal lattice: these are called dislocations, which interact via a long-range elastic field and contacts**

Nowadays, the behavior of metals at high deformation rate can only be studied experimentally by laser shocks. Thus, simulation is of paramount importance. Two approaches can be used at the mesoscopic scale of dislocations ensembles : molecular dynamics and elastodynamics simulations. This PhD thesis follows the second approach, based on our recent works [2, 3], thanks to which the first complete numerical simulations of the Dynamic Peierls-Nabarro Equation (DPN) [4] was performed. The latter equation describes dynamic plasticity, accounting for retardation in elastodynamic interactions between dislocations. (See also [5] for the same mathematical phenomena in the context of fractures.)

The DPN is a nonlinear integrodifferential equation, with two main difficulties : the non-locality in time and space of the involved operators. We simulated it thanks to an efficient numerical strategy [2] based on [6]. Nevertheless, the current implementation is limited to one CPU –thus forbidding thorough investigations on large-scale systems and on long-term behaviors.

**Objective** : Based on the algorithmic method of [2], implement a HPC solver (High Performance Computing) for the PND equation,

parallel in time and space, with distributed memory. This will be a preliminary step for the upcoming PhD.

**Candidate profile** : The candidate shall have a solid background in scientific computing applied to Partial Differential Equations. Mastering C++ with OpenMP and MPI is recommended. Moreover, interest and knowledge in physics or continuum mechanics will be a plus.

[1] Remington et coll., Metall. Mat. Trans. A 35, 2587 (2004).

[2] Pellegrini, Josien, Shock-driven motion and self-organization of dislocations in the dynamical Peierls model, soumis.

[3] Josien, Etude mathématique et numérique de quelques modèles multi-échelles issus de la mécanique des matériaux. Thèse. (2018).

[4] Pellegrini, Phys. Rev. B, 81, 2, 024101, (2010).

[5] Geubelle, Rice. J. of the Mech. and Phys. of Sol., 43(11), 1791-1824. (1995).

[6] Lubich & Schädle. SIAM J. on Sci. Comp. 24(1), 161-182. (2002).

## ■ Formation souhaitée :

M2 in scientific computing/Numerical analysis, Physics

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

C++ with OpenMP/MPI

## ■ Mots clés :

HPC, integrodifferential equation, dislocations

## ■ Possibilité de thèse :

Yes

## ■ Contact :

JOSIEN Marc  
marc.josien@cea.fr





# Simulation numérique de transferts thermiques dans une microstructure hétérogène

DEC/SESC/LMCP

**L'objectif de ce stage est d'évaluer une stratégie d'homogénéisation dans un milieu où sont couplés des phénomènes de transfert radiatif et de diffusion thermique.**

**La stratégie à mettre en œuvre implique la construction d'un code d'analyse de la géométrie d'un lit de particules.**

Les matériaux à microstructure hétérogène aléatoire, tels que les combustibles nucléaires, présentent, au niveau macroscopique, un comportement thermique ou mécanique équivalent à un matériau *homogène* [1]. Cette réduction drastique de la complexité par séparation d'échelles, appelée *homogénéisation*, est très profitable à la modélisation car elle permet une réduction des temps de calcul. Toutefois, l'obtention des caractéristiques *homogénéisées* du matériau virtuel (par exemple la conductivité thermique) à partir de la description de la microstructure du matériau est ardue notamment lorsque plusieurs phénomènes sont couplés.

L'objectif de ce stage est d'évaluer une stratégie d'homogénéisation dans un milieu où sont couplés des phénomènes de transfert radiatif et de diffusion thermique. Cette stratégie sera appliquée pour évaluer les propriétés homogénéisées d'un lit de fragments combustibles en situation hypothétique accidentelle.

Ce stage présente deux volets :

- Participer à la construction d'un outil de calcul numérique pour le transfert radiatif dans un milieu microstructuré. Il s'agit en particulier d'implémenter une stratégie de calcul des échanges radiatifs entre des surfaces. Deux

options sont envisagées : la méthode des transferts discrets, et une méthode de Monte-Carlo [2].

- Employer cet outil pour évaluer l'efficacité numérique de la procédure d'homogénéisation mise en place.

Ce stage s'inscrit dans une dynamique de recherche en cours. En cas de succès, il débouchera sur la rédaction d'un article scientifique.

Le candidat retenu possèdera un solide bagage en calcul scientifique, une bonne connaissance des phénomènes thermiques, aura une réelle appétence pour la recherche scientifique, et une expérience en développement de code.

## Bibliographie :

- [1] G. Allaire. Shape optimization by the homogenization method. 2002.
- [2] M. Modest and S. Mazumder. Radiative heat transfer. 2020

## ■ Formation souhaitée :

M2 de physique ou de calcul scientifique

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Maîtrise de Python et C++

## ■ Mots clés :

Homogénéisation, Transfert thermique radiatif

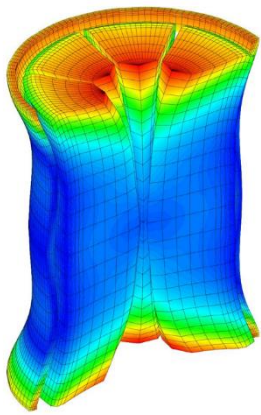
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

JOSIEN Marc/ VANSOON Jean-Mathieu  
[marc.josien@cea.fr](mailto:marc.josien@cea.fr)  
[Jean-Mathieu.VANSOON@cea.fr](mailto:Jean-Mathieu.VANSOON@cea.fr)





# Étude et Intégration d'un Algorithme de Raffinement Automatique de Maillage pour la Simulation Numérique des Combustibles

DEC/SESC/LMCP

**L'objet de ce stage est d'implémenter une méthode de Raffinement Automatique de Maillage au sein de la plateforme PLEIADES de simulation des combustibles, dans un contexte de modélisation mécanique du contact**

La simulation numérique joue un rôle essentiel dans la modélisation et la compréhension du comportement des combustibles nucléaires. Pour obtenir des résultats précis et pertinents, il est souvent nécessaire d'ajuster la résolution des simulations notamment au voisinage de variations locales de la grandeur d'intérêt. L'adaptation automatique de maillage [1] (AMR- adaptive mesh refinement en anglais) est une méthode numérique offrant la possibilité de raffiner localement le maillage en fonction des caractéristiques du problème tout en garantissant une solution précise dans un temps de calcul raisonnable.

L'objectif de ce stage est d'implémenter une méthode AMR, de type multigrille locale, dans la plateforme numérique de simulation des combustibles nucléaires PLEIADES [2], développée au CEA en partenariat avec EDF et FRAMATOME.

Cette méthode AMR a déjà été développée, en autonome, pour la mécanique du contact dans des travaux de thèse précédents [1, 3]. Il s'agit donc d'intégrer et généraliser ce module autonome dans la plateforme PLEIADES.

Pour mener à bien ces travaux :

1. vous examinerez les travaux antérieurs qui ont traité de l'AMR dans le contexte de la mécanique numérique du contact. Cela vous permettra de comprendre les principes de base de l'algorithme, ses avantages et ses limitations.

2. Vous porterez le module AMR dans la plateforme PLEIADES. Les premiers développements se feront en mécanique linéaire élastique sur des problèmes 2D et pourront être généralisés à des cas non-linéaires et/ou 3D.

3. Vous réaliserez des simulations de validation pour évaluer la performance de la méthode AMR, en comparant les résultats avec des données de référence.

4. Enfin, vous documenterez votre travail pour partager vos résultats avec l'équipe et préparer votre soutenance de stage.

En tant que stagiaire, vous aurez l'opportunité de collaborer avec des experts en simulation numérique, en mécanique des solides et physique nucléaire, pour relever le défi spécifique du raffinement automatique de maillage dans le contexte de l'interaction complexe entre la pastille combustible et la gaine. Votre contribution permettra de tester et d'améliorer les algorithmes AMR dans notre plateforme de simulation.

Si vous êtes motivé par les défis techniques et l'application des méthodes numériques avancées dans le domaine nucléaire, ce stage vous offrira une expérience précieuse dans le domaine de la simulation numérique au CEA.

Le solveur thermomécanique de la plateforme PLEIADES étant basé sur le code Cast3m, une connaissance de ce logiciel serait un atout.

## Références

[1] A unified framework for the computational comparison of adaptive mesh refinement strategies for all-quadrilateral and all-hexahedral meshes: Locally adaptive multigrid methods versus h-adaptive methods.  
[doi:10.1016/j.jcp.2021.110310](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110310)

[2] PLEIADES: A numerical framework dedicated to the multiphysics and multiscale nuclear fuel behavior simulation.  
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110577>

[3] On the coupling of local multilevel mesh refinement and ZZ methods for unilateral frictional contact problems in elastostatics.  
[doi:10.1016/j.cma.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.04.011)

## ■ Formation souhaitée :

- Master II en simulation mécanique des solides
- 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Cast3m,  
C++

## ■ Mots clés :

Mécanique des solides, Contact, Simulation numérique, Raffinement automatique de Maillage

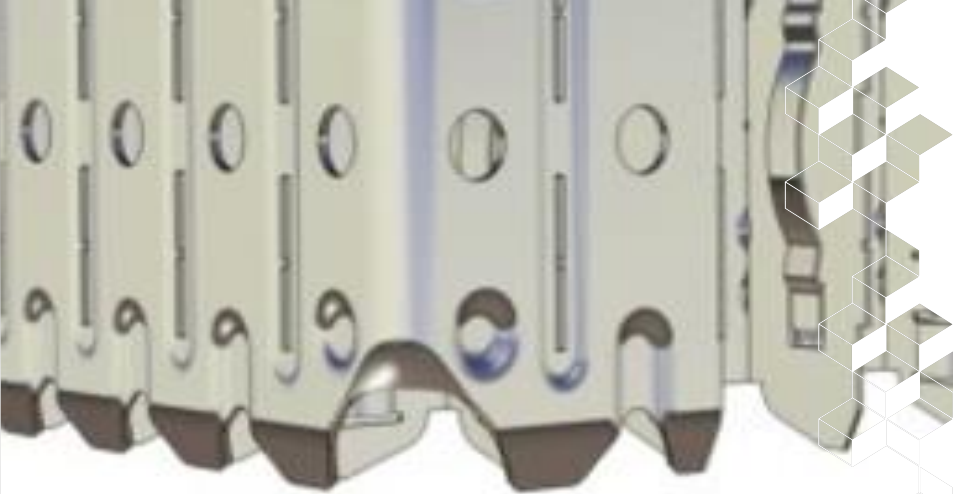
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

RAMIERE Isabelle  
[isabelle.ramiere@cea.fr](mailto:isabelle.ramiere@cea.fr)





## Vers une représentation multiéchelle du contact frottant pour les structures élancées

DEC/SESC/LMCP

**La modélisation dynamique de structures complexes peut nécessiter la prise en compte de phénomènes intervenant à des échelles très différentes. Or, une modélisation fine de ce type de structures entraîne généralement des coûts de calculs prohibitifs. La modélisation multiéchelle se présente alors comme une solution alternative à cette problématique en tenant compte de chaque phénomène à l'échelle la plus adéquate.**

Nous nous intéressons ici à des structures élancées soumises à des sollicitations mécaniques qui conduisent à des contacts frottants entre la structure et les éléments de maintien. Le stage proposé consiste alors à mettre en œuvre des modèles détaillés à base d'éléments finis tridimensionnels dans cette géométrie. Ils pourront servir de première étape de référence pour la mise au point de méthodes multiéchelles, tirant partie des particularités géométriques de la configuration d'intérêt pour réduire le coût de calcul tout en préservant au mieux la précision de la solution.

En pratique, le stage prévoit tout d'abord la construction d'un modèle représentatif du problème décrit ci-dessus et son analyse avancée en terme de robustesse, de sensibilité au maillage et de sensibilité aux options de modélisation pour le contact frottant.

Une seconde étape verra la mise en œuvre d'un prototype de méthode multiéchelle. Elle prendra comme référence les résultats du meilleur modèle de la première étape et consistera à réécrire le problème comme la superposition d'un problème grossier donnant le comportement global sans prise en compte du contact et d'un problème fin localisé au voisinage de la zone de contact. En s'appuyant sur des travaux antérieurs pour les éléments finis volumiques, cette seconde étape permettra de se familiariser avec les opérateurs de changement d'échelle et leur mise en pratique sur un cas concret représentatif.

Le travail proposé est ouvert pour une poursuite en thèse, dédiée à l'extension originale de l'approche multiéchelle à des éléments finis de natures différentes et impliquant de nouveaux opérateurs de changement d'échelle.

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 en mécanique numérique/analyse numérique

Compétences en simulation et programmation encouragées

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Éléments finis, CAST3M

### ■ Mots clés :

Mécanique numérique, approches multiéchelles, contact et frottement

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

RAMIERE Isabelle  
Isabelle.ramiere@cea.fr





## Towards a multi-scale representation of frictional contact for slender structures

DEC/SESC/LMCP

**The dynamic modelling of complex structures may require the consideration of phenomena occurring at very different scales. However, fine modelling of this type of structure generally entails prohibitive calculation costs. Multiscale modelling offers an alternative solution to this problem, taking account of each phenomenon at the most appropriate scale.**

We are interested here in slender structures subjected to mechanical loads that lead to frictional contact between the structure and the supporting elements. The proposed internship consists of implementing detailed models based on three-dimensional finite elements in this geometry. They will serve as a first reference step for the development of multi-scale methods, taking advantage of the geometric features of the configuration of interest to reduce the cost of calculation while preserving the accuracy of the solution.

Practically, the work will first involve building a model representative of the problem described above and carrying out an advanced analysis in terms of robustness, mesh sensitivity and sensitivity to modelling options for the friction contact.

The second step will see the implementation of a prototype multi-scale method. It will take as a reference the results of the best

model from the first step and will consist in rewriting the problem as the superposition of a coarse problem giving the global behaviour without taking into account the contact and a fine problem localised in the vicinity of the contact zone. Building on previous work on volumetric finite elements, this second step will provide a first opportunity to deal with change-of-scale operators and their practical application to a representative concrete case.

The proposed work is open to continuation as a PhD thesis, dedicated to the original extension of the multiscale approach to finite elements of different natures and involving new change-of-scale operators.

### ■ Formation souhaitée :

Master in computational mechanics/numerical analysis

Skills in simulation and programming recommended

### ■ Durée du stage :

6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Finite elements, CAST3M

### ■ Mots clés :

Computational mechanics, multiscale approaches, contact and friction

### ■ Possibilité de thèse :

Yes

### ■ Contact :

RAMIERE Isabelle  
Isabelle.ramiere@cea.fr



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

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

Les principales activités du DER concernent :

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

Le DER comprend quatre services :

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



# Reactor Studies Department

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

The main activities of the DER include:

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

The DER is divided into four services:

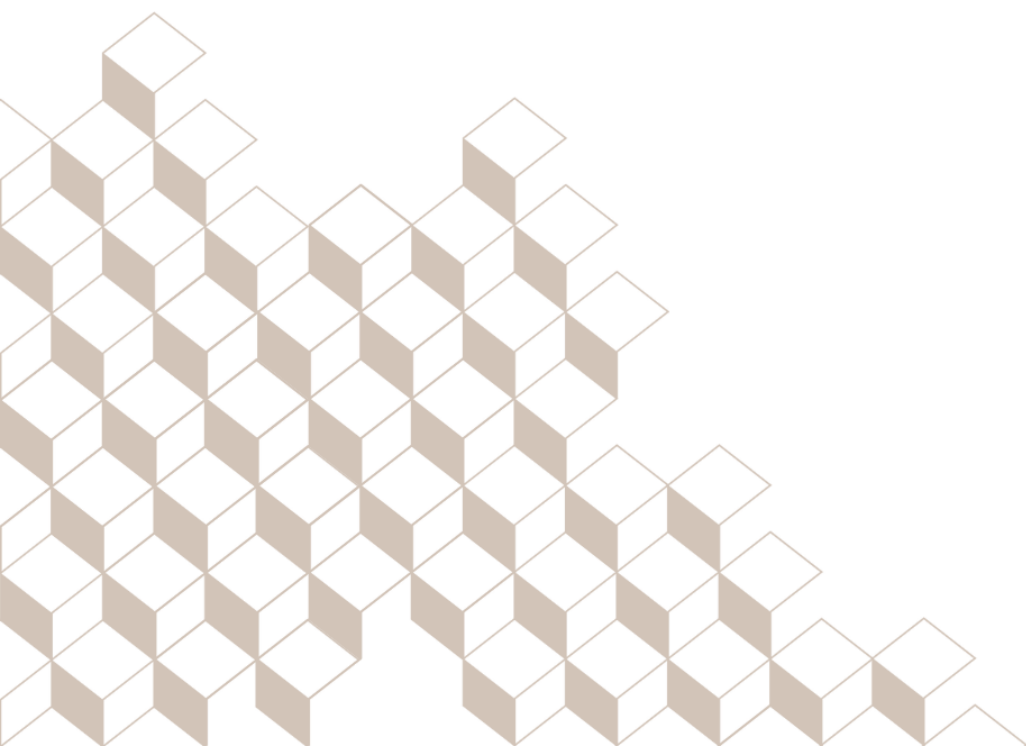
- The Innovative Systems Study Service (SESI),
- The Experimental Physics, Safety Testing, and Instrumentation Service (SPESI),
- The Reactor and Fuel Cycle Physics Service (SPRC),
- The Jules Horowitz Reactor Operations Service (SERJH).



# S E S I

Service d'étude  
des systèmes  
innovants

*Innovative Systems Research Unit*







## Développement d'un schéma de calcul simplifié de transitoire APRP dans un REP

DER/SESI/LCOS

**Cherche étudiant-ingénieur motivé par une première expérience dans le domaine des technologies nucléaires et intéressé par le développement informatique.**

De nos jours, les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) contribuent aux trois quarts de la production d'électricité nucléaire à travers le monde. C'est (de loin) la filière bénéficiant du plus grand retour d'expérience à travers le monde. Pour autant, ce n'est pas une technologie du passé : près du tiers des nouveaux projets de petits réacteurs concernent des REP.

L'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) est le scénario d'accident typique de cette filière, caractérisé par une vidange plus ou moins rapide du circuit primaire. Pour garantir le maintien des fonctions de sûreté, un certain nombre de dispositifs sont mis en place : injection de sécurité, accumulateurs, aspersion enceinte, refroidissement contrôlé... De plus en plus, on compte sur des systèmes passifs : leur déclenchement et/ou leur action ne requiert pas d'électricité, voire par de parties mobiles ou d'écoulement fluide.

Traditionnellement, ce type de transitoire accidentel est simulé à l'aide du code CATHARE, logiciel CEA dédié à la modélisation multiphysique des systèmes nucléaires. Au sein du laboratoire DER/SESI/LCOS, les ingénieurs ont également l'habitude de développer des schémas de calcul simplifiés, supposés fournir des résultats et des

tendances relativement proches de ce que donnerait CATHARE, mais à l'aide de simulations 100 à 1000 fois plus courtes. Ces modèles simplifiés très spécifiques visent à dégrossir un problème avant éventuellement de s'investir dans la réalisation d'un modèle CATHARE plus précis. Ils permettent également de balayer rapidement un large ensemble de configurations différentes avant de cibler les plus prometteuses d'entre elles, qui seront modélisées plus finement avec CATHARE.

De précédents travaux ont abouti à la création d'un premier outil en Python fournissant des résultats relativement conformes au code CATHARE. Le stage que nous proposons en 2025 consiste à améliorer la représentativité de ce modèle préliminaire et à l'enrichir par de nouveaux composants, passifs notamment (accumulateur gravitaire, échangeurs et enceintes passives, piscine à suppression de pression...). Intégré dans les équipes du laboratoire, l'étudiant aura pour mission annexe de contribuer par ses travaux au développement des outils de préconception du DER/SESI.

### ■ Formation souhaitée :

Génie nucléaire ;  
Thermohydraulique ;  
Thermodynamique ;  
Informatique

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

CATHARE ; Python ; Excel

### ■ Mots clés :

Développement, Modèles réduits, Simulation, Sûreté

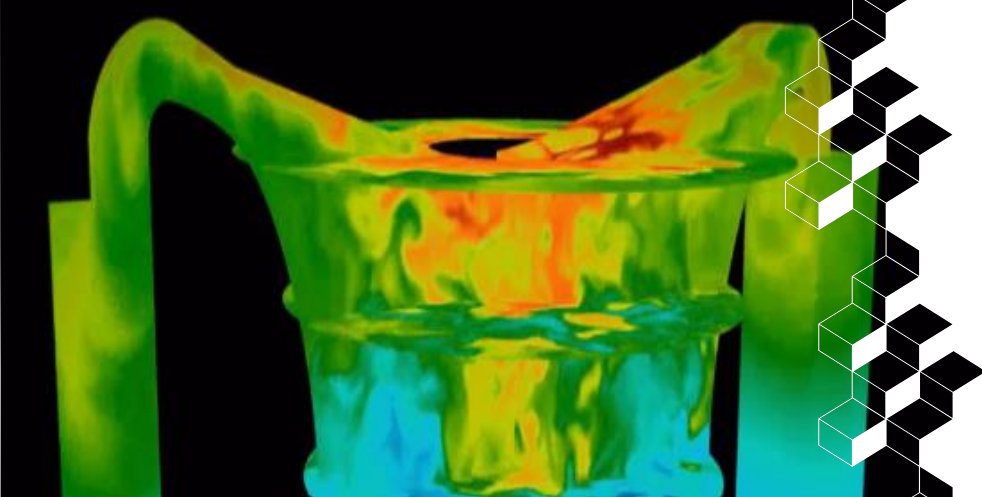
### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

Jérôme CARDOLACCIA  
jerome.cardolaccia@cea.fr





## Optimisation du schéma de pré conception de la boucle primaire d'un réacteur à sels fondus

DER/SESI/LCOS

**Les réacteurs à sels fondus reposent sur le principe d'intégrer le combustible directement dans le caloporteur. Ils font l'objet de différents projets à l'international du fait de leurs caractéristiques intéressantes concernant leur sûreté intrinsèque et leur capacité à incinérer des déchets radioactifs provenant des autres filières nucléaires.**

Au CEA, le réacteur à sels fondus MSR (Molten Salt Reactor) fait l'objet d'un projet pour en étudier la faisabilité et identifier les verrous techniques. Pour l'heure, la maturité technologique d'un MSR est basse et ses verrous importants, essentiellement dus à la méconnaissance de la chimie du sel chlorure et de la résistance des matériaux à la corrosion.

Au sein du Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI) un code de préconception pour un réacteur MSR est en cours de développement (ATOS).

Ce code est conçu comme outil permettant d'effectuer des calculs de pré dimensionnement simplifiés et rapides afin de permettre des études paramétriques et ensuite des études de propagation des incertitudes et d'optimisations du système. La programmation orientée objet d'ATOS permet une interaction simple avec d'autres outils.

Pour les études de propagation des incertitudes et d'optimisation, un couplage d'ATOS avec le code URANIE (plateforme de référence du CEA pour l'optimisation, la méta-modélisation et l'analyse d'incertitude) est en cours. Ce stage s'inscrit dans la poursuite du développement de ce couplage.

étapes. Dans une première phase l'objectif sera d'acquérir des compétences dans la conception des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération et dans les systèmes des MSR. Dans une deuxième phase, le candidat se familiarisera avec les codes. Ensuite, il est prévu d'effectuer le couplage ATOS-URANIE avec l'objectif de mettre en place un module d'optimisation du système de la boucle réacteur en fonction des contraintes imposées. L'optimisation sera basée sur des méthodes comme les réseaux de neurones ou d'autres techniques incluses dans la plateforme URANIE.

Le stage se déroule au Service d'Etudes des Systèmes Innovants (SESI) au laboratoire LCOS. Ce service est une unité pluridisciplinaire porteuse de compétences en conception, fonctionnement et sûreté des réacteurs nucléaires, thermohydraulique, énergétique. Les missions du LCOS concernent la préconception et l'optimisation des systèmes nucléaires.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur généraliste, Nucléaire, Méthodes numériques, Programmation orienté objet

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

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

### ■ Mots clés :

Molten Salt Reactor; Physique des réacteurs; Pré conception; Etude d'optimisation.

### ■ Possibilité de thèse :

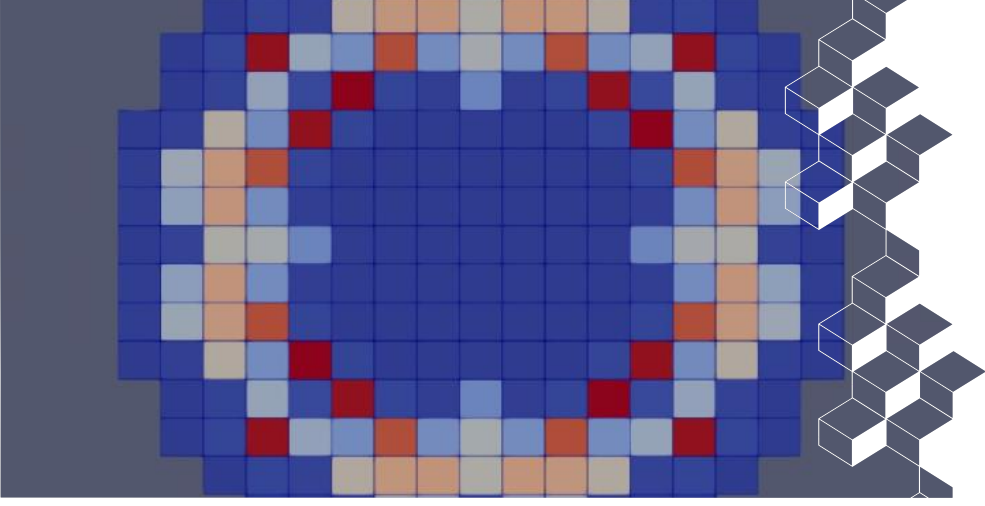
Non

### ■ Contact :

FORNO Barbara  
barbara.forno@cea.fr

Le stage se déroulera en différentes





## Modélisation physico-numérique d'accidents de perte de réfrigérant primaire avec une méthode de machine learning innovante

DER/SES/LEMS

**Ce stage est intégré au Laboratoire d'Études et Modélisations des Systèmes du CEA Cadarache, qui compte une équipe multidisciplinaire de chercheurs en thermohydraulique, énergétique, et statistiques.**

**L'étudiant travaillera sur un transitoire accidentel emblématique des réacteurs nucléaires couramment étudié en ingénierie. Il aura l'opportunité de se former à la recherche et développement dans les domaines de la thermohydraulique double-phase et de la science des données.**

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 grands réacteurs de puissance civils.

La méthode historique de calcul repose sur une estimation du pic de température des gaines protégeant le combustible nucléaire avec un code de calcul thermohydraulique système. Les cinétiques et les conditions des APRP étant très variées, les études de sûreté modernes requièrent des séries de calculs incluant un traitement statistique des données incertaines du scénario accidentel.

Des recherches réalisées au CEA sur des combustibles nouveaux envisagés pour le futur ont soulevé que la grandeur d'intérêt calculée au cours de l'APRP pourrait également être la masse volumique atteinte par l'eau au cours de la dépressurisation. Cette masse volumique minimale a en effet un impact important sur la neutronique du combustible et donc sur sa variation de puissance.

Ce stage propose d'explorer les masses volumiques probables au cours d'accidents d'APRP en employant la nouvelle méthodologie

statistique ICSCREAM (Identification of penalizing Configurations using SCREening And Metamodel), développée au CEA au début des années 2020.

Cette méthode d'analyse de risque, dont certaines étapes continuent de faire l'objet de travaux de R&D amont, combine des techniques d'apprentissage et de modélisation statistiques. Elle permet, à partir d'un nombre de simulations raisonnable de calculs thermohydrauliques, d'estimer la probabilité de dépassement d'un critère de sûreté ainsi que d'identifier et de hiérarchiser les phénomènes physiques et les paramètres scénario ayant un impact majeur sur le transitoire.

Au cours de son stage, l'étudiant travaillera sur une modélisation avec l'outil de calcul thermohydraulique Cathare3 d'un circuit hydraulique de réacteur à eau pressurisée. Il se formera à la thermohydraulique diphasique, à la phénoménologie de l'ébullition, et aux bases de la sûreté des réacteurs. Il acquerra une expérience en science des données en travaillant avec des méthodes statistiques récentes. Suivant l'évolution des travaux et ses préférences, il pourra orienter la suite du sujet de stage vers des améliorations de la méthode ICSCREAM ou vers une étude physique rigoureuse appliquée à la sûreté des réacteurs.

■ **Formation souhaitée :**  
Master/Ingénieur en Génie nucléaire, mécanique des fluides, thermohydraulique.

Appétence souhaitée pour les mathématiques appliquées et la programmation.

■ **Durée du stage :**

6 mois

■ **Méthode/logiciel(s) :**

OS Linux et Windows, code de calcul CEA Cathare3, python, shell-bash

■ **Mots clés :**

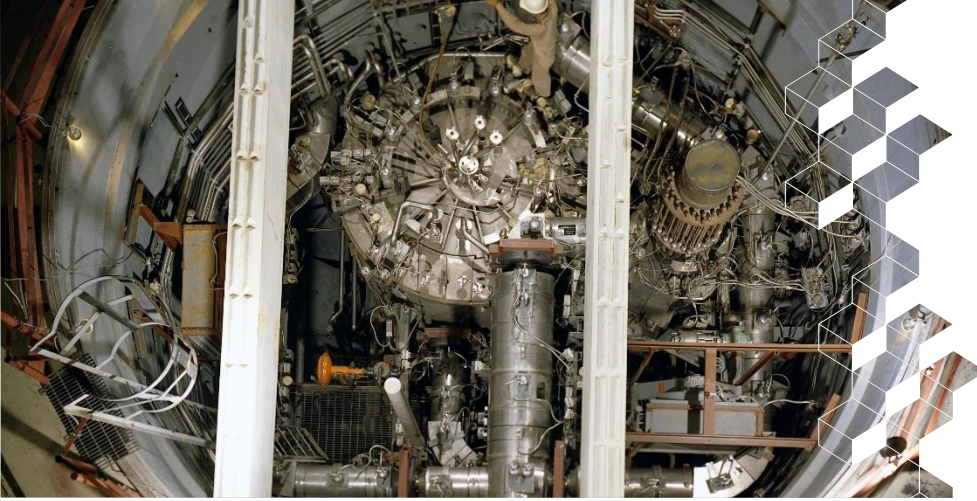
Thermohydraulique, sûreté, statistiques, machine learning, métamodélisation

■ **Possibilité de thèse :**

Oui

■ **Contact :**

MANCHON Xavier  
xavier.manchon@cea.fr



# Etude de la dynamique libre d'un réacteur à sel fondu avec le code CATHARE3

DER/SESI/LCOS

Les réacteurs à sels fondus (RSF) sont un des 6 concepts de réacteur sélectionnés dans le cadre du forum Génération IV. Dans ce type de concept, le combustible est un mélange de sel d'actinides fondu assurant la double fonction de produire de la chaleur par les réactions nucléaires et de transporter la chaleur vers les systèmes de conversion d'énergie. Le CEA s'intéresse à ce concept depuis 2020 dans le cadre du projet France Relance ISAC. Ce projet vise à préconcevoir une esquisse de RSF à spectre de neutrons rapides, le réacteur ARAMIS, dédiée à la transmutation des actinides mineurs.

Le stage propose de réaliser des calculs de fonctionnement du réacteur ARAMIS avec le code de thermohydraulique système CATHARE3, récemment étendu à la filière des combustibles liquides.

Dans un réacteur à sel fondu, le combustible est constitué d'un mélange de sel d'halogénure et de noyaux fissiles. Ce mélange est liquide à haute température ( $>400^{\circ}\text{C}$ ). Au sein d'un RSF, le combustible liquide circule dans un circuit fermé et assure à la fois la fonction de production de chaleur et de transport de chaleur.

La maîtrise de la température du sel permet de piloter le réacteur via les contre-réactions neutroniques. Un refroidissement du sel tend à augmenter la puissance dégagée par densification du milieu salin, tandis qu'un échauffement du sel induit une baisse de la puissance. Les RSF ont été étudiés aux Etats-Unis dans les années 1960 avec la réalisation de prototypes de faible puissance (ARE, MSRE). Depuis une quinzaine d'années un regain d'intérêt se développe à l'international autour de cette technologie avec de nombreux projets de réacteurs (USA, Russie, Chine, Europe) et notamment en France avec le projet ISAC.

Le projet ISAC est un projet issu du plan France Relance ayant pour objectif d'étudier la transmutation des déchets radioactifs à vie longue dans un RSF à neutrons rapides. Le projet ISAC a démarré en 2022 pour une durée de 4 ans. Il regroupe 5 partenaires (CEA, CNRS, EDF, FRAMATOME, ORANO). Un de ces objectifs est de préconcevoir une esquisse de RSF dédiée à la transmutation (réacteur ARAMIS).

Le code de thermohydraulique système CATHARE3 est le code de référence en France pour l'étude du fonctionnement des réacteurs à eau légère (REL) et des réacteurs refroidis au sodium (RNR-Na). Il a fait l'objet de développements récents visant à modéliser les réacteurs à combustible liquide.

En 2024, un premier modèle du réacteur ARAMIS avec CATHARE3 a été développé. Le premier objectif du stage proposé est d'adapter et préciser ce modèle vis-à-vis de la dernière version de l'esquisse ARAMIS. Le second

objectif est de réaliser les calculs de plusieurs transitoires de fonctionnement du réacteur (scénario de perte de source froide; scénario d'insertion de réactivité; scénario de pertes ou d'accélération des pompes d'une ou plusieurs pompes).

Le stage se déroulera en plusieurs étapes, pré-identifiées ci-dessous :

- Mise-à-jour des propriétés des sels fondus dans CATHARE3.
- Mises à jour des données d'entrées vers la dernière version de l'esquisse ARAMIS (géométrie des circuits et composants, données neutroniques, corrélations).
- Amélioration de la modélisation : prise en compte de la circulation des précurseurs de puissance résiduelle, raffinement de la modélisation du cœur, ajout d'un circuit d'évacuation de puissance résiduelle, particularisation d'une boucle.
- Réalisation des transitoires de fonctionnement spécifiés dans ISAC.
- Comparaisons avec les résultats obtenus avec le code MOSAICS (code de transitoire simplifié adapté au RSF et utilisé au CEA dans le cadre du projet ISAC).

Le stage sera réalisé au sein du DER/SESI à CADARACHE (Conception et études de fonctionnement des RSF). Des interactions fortes avec les équipes de développement du code CATHARE3 au Dm2S/STMF sont prévues.

Les résultats du stage seront valorisés dans le cadre du projet ISAC et pourrons faire l'objet de publication externe.

## ■ Formation souhaitée :

Diplôme d'Ingénieur ou équivalent en physique des réacteurs

Domaines: Thermique, thermo hydraulique, cinétique neutronique

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

C++, Python, Logiciels de bureautique, Solidworks, CATHARE 3

## ■ Mots clés :

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

## ■ Possibilité de thèse :

Non

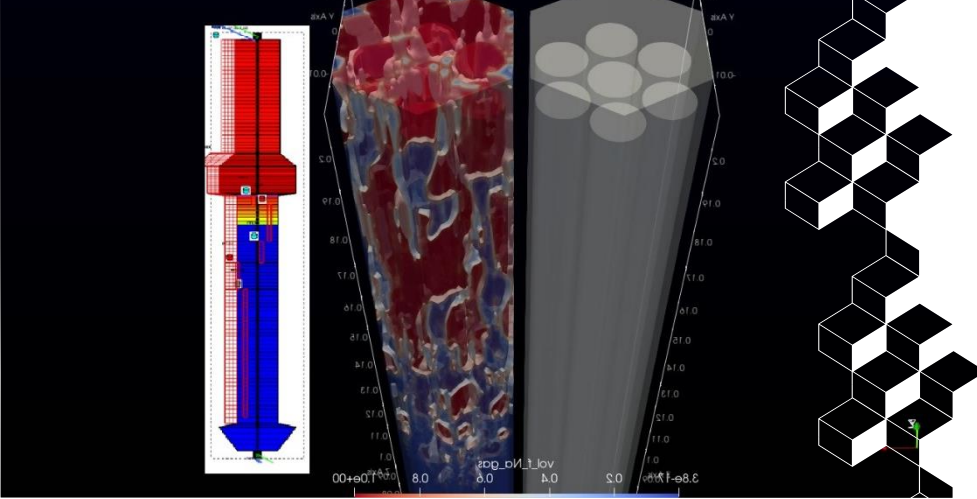
## ■ Contact :

PASCAL Vincent (SESI/LCOS)

[vincent.pascal@cea.fr](mailto:vincent.pascal@cea.fr) (CADARACHE)

ANDERHUBER Marine (STMF/LMEC)

[marine.anderhuber@cea.fr](mailto:marine.anderhuber@cea.fr) (SACLAY)



# Etude CFD diphasique des écoulements Na en ébullition pour les réacteurs de 4eme génération

DER/SESI/LEMS

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

**L'objectif de ce stage est de réaliser des études CFD pour la modélisation de l'ébullition du Sodium dans un réacteur de 4eme génération**

Les études pour la démonstration de sûreté s'appuient sur des outils de calcul scientifique qualifiés à différentes échelles numériques, typiquement système, et CFD.

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

Afin d'améliorer la compréhension de l'ébullition, l'objectif du stage sera d'appliquer de nouveaux modèles dédiés pour prédire correctement le transfert de chaleur et de masse à l'interface liquide-vapeur. Les principales étapes du stage seront les suivantes:

solutions logicielles disponibles au laboratoire, identifier les données expérimentales disponibles et prendre en main les outils. Comprendre les différentes échelles numériques (système-CFD) et les différentes démarches pour résoudre la thermique du problème.

- Réalisation de maillages en géométrie d'intérêt en accord avec les prescriptions liées aux schémas numériques du code de calcul. Utiliser les ressources de calcul avancés (cluster).
- Simulation selon une progression en terme de difficulté: monophasique (avec éléments de validation) puis diphasique d'écoulement eau-air et sodium bouillant.
- Vérifier la faisabilité des derniers modèles d'ébullition dans NEPTUNE-CFD lorsqu'ils sont appliqués au sodium.

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

neptune\_cfd / Cathare-3/  
Salome / python / URANIE

## ■ Mots clés :

CFD, simulation, systèmes passifs, condensation, validation

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

Perez, Jorge

[jorge.perezmanes@cea.fr](mailto:jorge.perezmanes@cea.fr)

- Bibliographie et tutoriaux des



# Modélisation du comportement en convection naturelle d'un réacteur à sels fondus – Application au réacteur ARAMIS

DER/SES/LCOS

Les réacteurs à sels fondus (RSF) sont l'un des six concepts de réacteurs quatrième génération (GenIV), retenus par le forum international GIF. C'est un type de réacteur nucléaire qui présentent la particularité d'avoir un sel à l'état liquide qui joue le double rôle de combustible et caloporteur. D'abord étudiés aux Etats-Unis dans les années 60, ils font aujourd'hui l'objet de différents projets à l'international du fait de leurs caractéristiques intéressantes concernant leur sûreté intrinsèque et leur capacité à incinérer des déchets radioactifs provenant des autres filières nucléaires.

Le CEA s'intéresse à l'étude de leur faisabilité et aux études de sûreté correspondantes. Dû au changement de paradigme en comparaison à des réacteurs à combustible solide, une analyse des nouvelles problématiques de sûreté rencontrées est nécessaire pour la conception de systèmes de sauvegarde associés, afin d'actualiser la démarche de sûreté à la conception pour cette nouvelle filière.

Dans un contexte environnemental de décarbonation croissant des énergies et de l'industrie à l'échelle nationale et internationale, le développement de systèmes nucléaires innovants pour la production d'électricité et de chaleur décarbonnés est un enjeu majeur.

Le candidat sera intégré au LCOS (Laboratoire de Conception et d'Optimisation des Systèmes) au sein d'une équipe de spécialistes en conception de systèmes énergétiques basé à Cadarache dans les Bouches-du-Rhône.

Dans ce contexte, le LCOS réalise notamment des études de conception des systèmes nucléaires innovants de 4<sup>ème</sup> génération (GenIV). Ces études comportent des représentations CAO, des pré-dimensionnements des composants et des évaluations simplifiées de sûreté, de performance et de technico-économie. Deux filières de réacteurs à neutrons rapides GenIV sont particulièrement étudiées : la filière sodium et la filière des réacteurs à sels fondus (RSF).

En janvier 2022 démarre le projet ISAC (Innovative System for Actinide Management), réunissant les partenaires français (CEA, CNRS, Orano, EDF et Framatome), dans le cadre du plan *France Relance*. Ce projet a pour but le développement de l'esquisse du RSF ARAMIS-A afin d'étudier la faisabilité d'un RSF transmutateur d'actinides mineurs issus du retraitement des combustibles usés, considérés comme des déchets à vie longue, dans un réacteur à sels fondus.

A ce propos, de nouvelles méthodes de pré-conception pour les RSF ont été développées, et ont été regroupées dans un code en langage Python, ATOS (Advanced Tools for the Optimization of Systems). La programmation orientée objet d'ATOS permet une interaction simple avec d'autres outils. Un modèle pour le prédimensionnement d'un système de sauvegarde pour l'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR) en cas accidentel est disponible.

Néanmoins cet outil d'ordre réduit ne permet pas de capter la complexité de la phénoménologie de la convection naturelle, en particulier dans la région du

cœur, caractérisée par des fluctuations de grande amplitude.

L'étudiant sera amené à réaliser des calculs CFD en situation de convection naturelle à l'aide de l'outil CEA TRIO-CFD, afin d'apporter un retour pour la simulation avec des codes simplifiés et de proposer des solutions techniques liées au prédimensionnement du réacteur ARAMIS-A. Le deuxième volet du stage consistera au développement des modèles simplifiés afin d'approfondir dans la compréhension du couplage neutronique-thermohydraulique en situation de convection naturelle.

En outre, le code ATOS pour la préconception des systèmes pourra être utilisé dans ce stage comme support des études CFD et l'analyse dimensionnel.

Plus particulièrement, le stage consistera à :

- S'approprier le contexte du parc nucléaire actuel et du positionnement des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération dans ce cadre ;
- Acquérir des compétences dans la conception des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération et la démarche de sûreté à la conception ;
- Réaliser et analyser des calculs CFD en situation de convection naturelle avec l'outil TRIO-CFD qui permettent d'évaluer le fonctionnement et la sûreté des solutions techniques proposées concernant les systèmes de sauvegarde EPuR ;
- Développer des modèles analytiques pour la compréhension physique du couplage neutronique-thermohydraulique en situation de convection naturelle ;
- Apprendre à utiliser les outils de conception existants, typiquement l'outil de calcul ATOS dédié à la préconception des RSF.

## ■ Formation souhaitée :

Génie nucléaire, Mécanique des fluides, Génie énergétique et Programmation orienté objet

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

TRIO-CFD, ATOS

## ■ Mots clés :

CFD, Python, Linux

## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

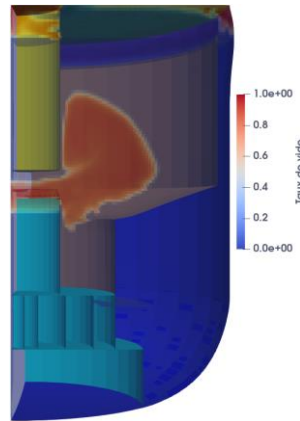
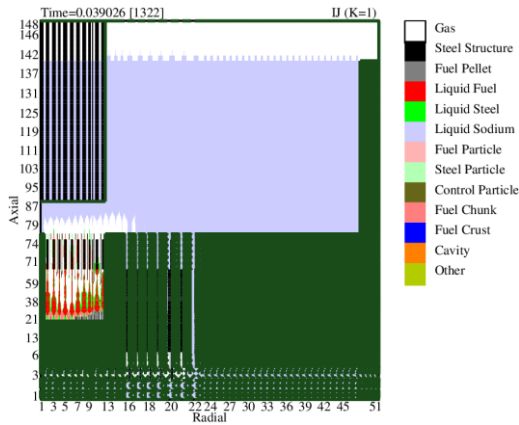
MARTIN LOPEZ, Elena  
elena.martinlopez@cea.fr



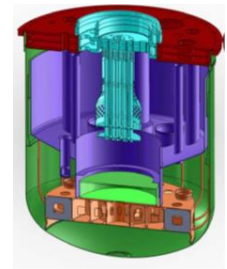
**SIMMER**



# Conséquences d'un accident de fusion du cœur sur le confinement d'un Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au sodium liquide (RNR-Na)



DER/SESI/LEMS



**Le stage se déroulera au Laboratoire d'Études et Modélisations des Systèmes (LEMS), qui a pour mission de réaliser des études détaillées sur des systèmes nucléaires.**

L'équipe Accidents Graves du LEMS travaille avec 2 outils de calculs distincts permettant de décrire les transitoires accidentels pouvant intervenir dans un Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au sodium (RNR-Na) :

- un logiciel de simulation de la dégradation du cœur, nommé SIMMER ;

- et un autre logiciel de dynamique rapide (structures et fluides), nommé EUROPLEXUS.

SIMMER modélise la dégradation du cœur (échauffement, fusion, etc.) mais ne contient pas de modèle de comportement mécanique des structures. EUROPLEXUS contient les modèles de comportement mécanique mais n'est pas capable de simuler la dégradation du cœur. Une étape de transmission entre les 2 outils est donc nécessaire. Le chaînage permet d'aller du début du scénario jusqu'aux conséquences sur le confinement.

SIMMER détermine la zone fondue du cœur (mélange combustible, sodium et acier vaporisés) et l'énergie issue de son interaction avec le sodium liquide.

EUROPLEXUS modélise ce type d'accident par une bulle de gaz pressurisée qui va se détendre dans le bloc réacteur, sollicitant mécaniquement l'enveloppe de celui-ci, formée de la cuve principale et de la dalle supérieure.

La procédure de transmission implique différents critères et se fait via un script en Python existant.

Les études les plus abouties se font sur des modèles 3D avec structures axisymétriques

Le travail proposé est d'adapter le script en Python pour permettre l'introduction, à l'intérieur du bloc réacteur, de composants non axisymétriques (échangeurs, pompes, etc.) et d'analyser l'impact sur les résultats.

Le stage sera décomposé en plusieurs étapes successives :

- Prise en main du code de calcul EUROPLEXUS et d'un jeu de données réacteur.

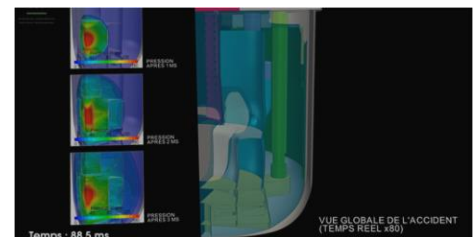
- Prise en main des grandeurs de sorties générées par le code de calcul SIMMER.

- Adaptation du script de chaînage en Python au maillage 3D de SIMMER avec structures internes non axisymétriques.

En complément, des études de sensibilité pourront être envisagées (critères de chaînage, modèle de détente de bulle, etc.).

Ce stage implique l'utilisation de codes de simulations numériques et des compétences de base sur l'utilisation d'un système d'exploitation UNIX/Linux sont requises.

Ce stage s'adresse aux étudiants de 3ème année d'école d'ingénieurs, et éventuellement aux étudiants de 2ème année.



- Formation souhaitée :  
Ecole d'ingénieur ou Master 2

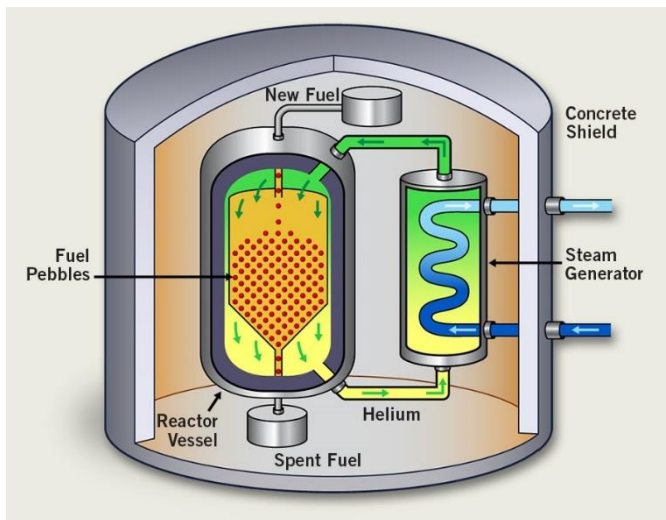
- Durée du stage :  
4 à 6 mois

- Méthode/logiciel(s):  
Système d'exploitation  
Unix/Linux, Python, SIMMER,  
EUROPLEXUS, Fortran

- Mots clés :  
Thermohydraulique, physique  
des réacteurs, mécanique,  
simulation numérique

- Possibilité de thèse :  
Non

- Contact :  
Sophie BAJARD, Nicolas SCHMIDT  
[sophie.bajard@cea.fr](mailto:sophie.bajard@cea.fr)  
[nicolas.schmidt@cea.fr](mailto:nicolas.schmidt@cea.fr)



## Développement d'un outil simplifié pour l'étude d'un accident de perte de débit primaire sur réacteur à haute température

IRSN/DER/SES/LCOS

Le LCOS (Laboratoire de Conception et d'Optimisation des Systèmes) propose un stage d'ingénieur thermo hydraulicien dont l'objectif est la modélisation et l'étude de réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération de type réacteur à haute température.

Les réacteurs à haute température sont l'un des six concepts de réacteurs dit de quatrième génération (GenIV) retenus par le forum international GIF. Ces réacteurs possèdent le double avantage de fonctionner avec un spectre rapide et de produire de la chaleur de haute température. Le spectre rapide permet de mettre en œuvre la stratégie française de fermeture du cycle du combustible d'ici la fin du siècle. La production de chaleur de haute température permet de décarboner des procédés industriels très énergivores.

Leur conception est basée sur l'utilisation d'un combustible sous forme de billes sans assemblage et d'un gaz comme caloporteur.

Le stage sera effectué au sein du LCOS (Laboratoire de 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 consistera à :

- Faire une étude bibliographique afin de s'approprier le sujet et d'acquérir les compétences nécessaires sur les RNR-HTR, les accidents et le combustible TRISO.
- Prendre en main le code Macarena qui simule le fonctionnement normal et les séquences accidentelles des réacteurs à neutron rapides au sodium RNR-Na.
- Adapter le code Macarena pour permettre les calculs thermohydrauliques sur des réacteurs à haute température.
- Comparer les RNR-HTR aux RNR-Na et RNR-Pb dans le cas d'une perte de débit primaire.

Référence décrivant la démarche physico-statistique et les outils simplifiés dans le contexte de la filière RNR-Na :

*Droin et al., "Safety-oriented SFR core design: Methodology and application to transient bifurcations and stability maps analyses", Annals of Nuclear Energy, 187, 109790, 2023.*

### ■ Formation souhaitée :

Génie nucléaire, mécanique des fluides, thermique

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Matlab / Python

### ■ Mots clés :

RNR-HTR, combustible TRISO, accidents, modélisation

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

Mickaël LE BOHEC

mickael.lebohec@cea.fr





# Méthodologie de déploiement d'une flotte de réacteurs nucléaires innovants piloté par les besoins du réseau

DER/SESI/LCOS

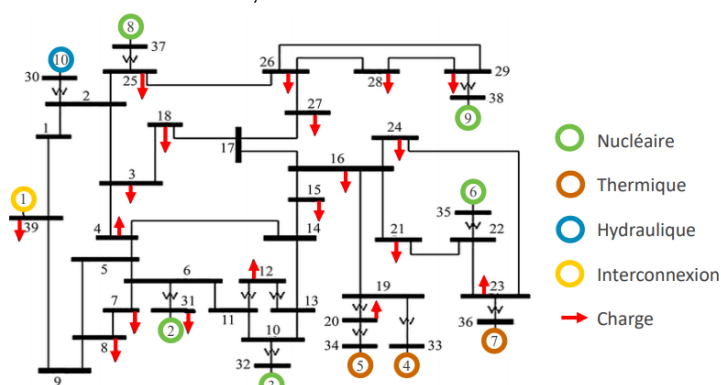
## Cherche étudiant-ingénieur motivé par une première expérience dans les domaines des technologies de l'énergie et de la simulation numérique.

Les réseaux électriques sont à un pays ce que le système sanguin est au corps humain : le pourvoyeur d'énergie électrique indispensable à la vie quotidienne de tous les organes de la société. Il s'agit d'un système très complexe qui doit garantir à tout instant l'équilibre entre la demande des consommateurs et la puissance injectée sur ses lignes. Or aujourd'hui, la transition énergétique constitue un défi majeur pour l'équilibre des réseaux électriques, à cause de la connexion, de plus en plus importante de sources de puissances intermittentes dépendant de l'ensoleillement et de la force des vents. Dans ce contexte, la non-volatilité et la pilotabilité de la production nucléaire (qui est quasiment décarbonée) sont des atouts indéniables pour stabiliser le réseau. L'effet stabilisant lié à l'ajout sur le réseau d'un nouveau réacteur nucléaire dépendra sensiblement de sa localisation sur le territoire, de sa puissance et de ses capacités en matière de flexibilité. Pour calculer et optimiser ces données, il est

nécessaire de disposer d'un logiciel de simulation numérique du réseau électrique.

Les mécanismes qui permettent de piloter l'équilibre du réseau à court, moyen et long termes proviennent à la fois de lois physiques mais aussi de dispositifs de réglementation et de planification technico-économique. Or les logiciels de simulation disponibles actuellement prennent en compte soit la physique, soit la technico-économie, jamais vraiment la combinaison des deux.

L'objectif de ce stage est de dessiner les contours d'une méthodologie de résolution numérique qui permette de calculer l'équilibre et la planification du réseau électrique en prenant en compte à la fois les contraintes économiques (CAPEX, OPEX), opérationnelles (capacités de pilotage) mais également physiques (statisme, inertie, répartition géographique...).



### ■ Formation souhaitée :

Physique ; Génie électrique ; Génie nucléaire ; Méthodes numériques ; Mathématiques appliquées

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Python ; PowerFactory ; Optimisation sous contraintes (Antares, MARKAL/TIMES)

### ■ Mots clés :

Energétique; Réseau électrique

### ■ Possibilité de thèse :

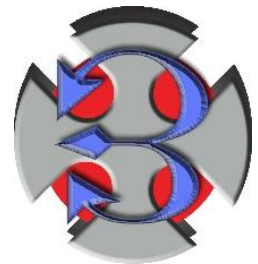
Oui

### ■ Contact :

Charly BOUDOT  
charly.boudot@cea.fr

# Contribution au développement d'un simulateur de réacteur au sodium basé sur CATHARE3

DER/SESI/LCOS



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

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

Le stage proposé s'inscrit dans ce cadre. Il s'agit d'apporter sa pierre à l'édifice en ce qui concerne la transition de DYN4G vers CATHARE3 pour le simulateur SIRENA. Des premiers travaux ont été menés par des ingénieurs-chercheurs, un stagiaire et un doctorant du DER/SESI respectivement en 2021 [1], 2022 [2] et 2023 [3].

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

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

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

## 2/ Passage sur CATHARE3

- Prise en main du jeu de données CATHARE existant du réacteur Superphénix ;
- Modélisation/simulation de certains transitoires étudiés dans la partie 1 et analyse physico-numérique (résultats, temps de calcul en modes séquentiel et parallèle) ;
- Recommandations pour la perspective simulateur RNR-Na sur base CATHARE3.

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

[1] L. Matteo, V. Pascal « Bilan des actions de consolidation et de pérennisation du simulateur SIRENA et réflexions autour du développement d'un simulateur sur base CATHARE3 », 2021.

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

[3] V. Audoly, « Etude dynamique d'un cycle de Rankine Eau-Vapeur de réacteur nucléaire au cours de transitoires normaux et accidentels. Avancement de 1<sup>ère</sup> année de thèse », 2023.

## Formation souhaitée :

Ingénieur (3<sup>ème</sup> année) ou Master 2 en énergie nucléaire

## Durée du stage :

6 mois

## Méthode/logiciel(s):

CATHARE3, SIRENA, linux

## Mots clés :

Simulateur, Superphénix, thermo-hydraulique système

## Possibilité de thèse :

Non

## Contact :

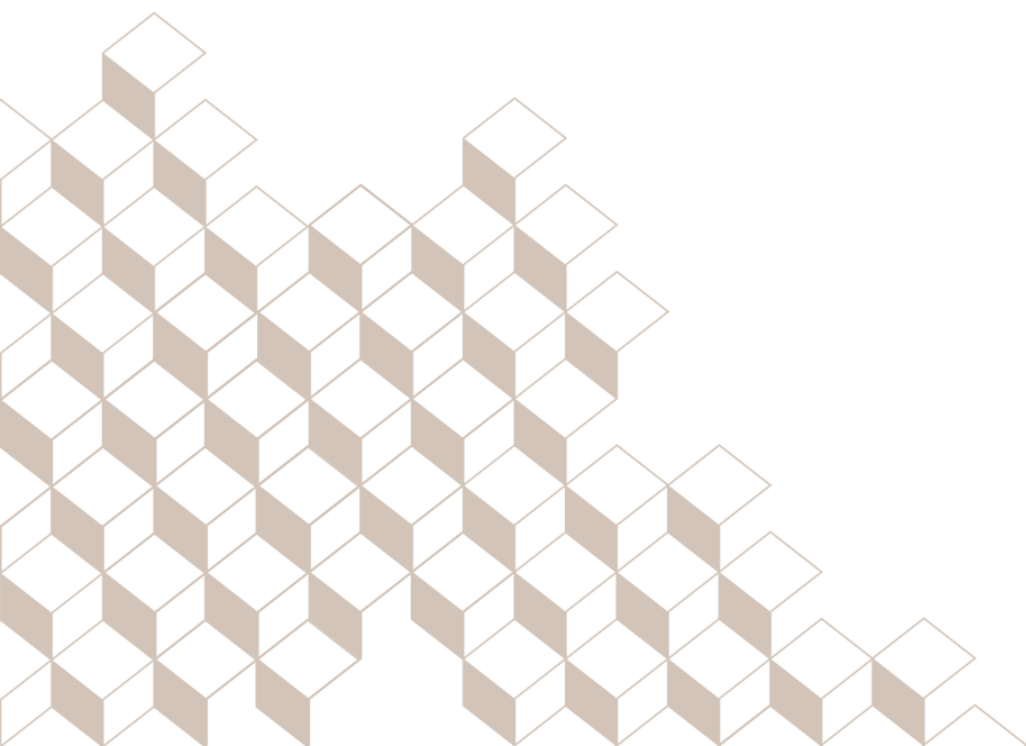
Lorenzo LONGO & Laura MATTEO  
lorenzo.longo@cea.fr



# SPESI

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

*Experimental Physics, Safety Testing  
and Instrumentation Unit*





## Simulation Monte Carlo des impulsions d'une chambre à fission

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 une quinzaine d'années, le Laboratoire de Dosimétrie Capteur et Instrumentation (LDCI) du CEA Cadarache travaille sur l'optimisation et la fiabilisation des chambres à fission, des détecteurs neutroniques essentiels pour l'opération et la sûreté des réacteurs électrogènes et pour la mise en œuvre d'expérience en réacteur de recherche, notamment le futur Réacteur Jules Horowitz. Ces applications entraînent une demande accrue pour des détecteurs innovants, fiables et parfaitement maîtrisés. Un important travail de modélisation a été parallèlement mené et a conduit à l'outil de modélisation de référence du LDCI, nommé Chester. Celui-ci procède à une simulation Monte Carlo en langage Root avec un interfaçage sommaire avec la suite Garfield développée au CERN pour les détecteurs à gaz, ainsi qu'avec le logiciel SRIM pour le calcul de l'énergie déposée dans le gaz par les produits de fission.

Le stage proposé consiste à procéder à une refonte de Chester en mettant à profit les

récents développements de Garfield, anciennement en Fortran et maintenant en C++. Le travail repose sur la compréhension des phénomènes physiques sous-jacents à la formation du signal, avec pour objectif de déterminer les caractéristiques d'un détecteur répondant à un besoin donné dans un environnement donné et à prolonger la durée d'utilisation des chambres en permettant un diagnostic en ligne de défaillances éventuelles.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur 2ème année / Master 1  
Instrumentation nucléaire

### ■ Durée du stage :

4 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

C++, Garfield++, SRIM, Root

### ■ Mots clés :

Interaction rayonnement matière, simulation, mesures physiques

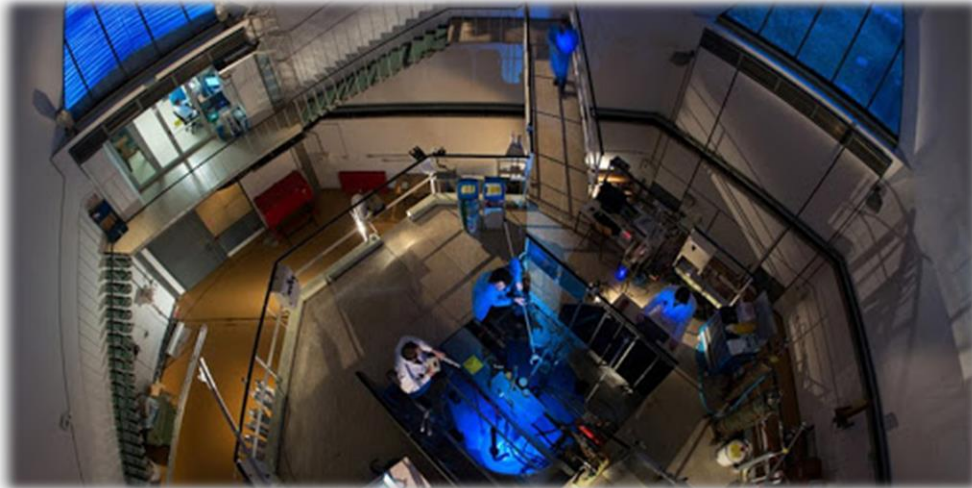
### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

FILLIATRE Philippe  
[philippe.filliatre@cea.fr](mailto:philippe.filliatre@cea.fr)





## Portage sur FPGA d'algorithmes de traitement de signaux issus de SiPM

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 optiques. L'acquisition des signaux est réalisée avec SiPM et des digitizer haute fréquence. Jusqu'à présent nous avons travaillé avec un faible nombre de voies (2 ou 3 maximum) et l'ensemble du traitement des données était réalisé à posteriori. Nous souhaitons maintenant augmenter significativement le nombre de voies de lecture (une dizaine dans un premier temps puis à terme une centaine) et réaliser un traitement de données en ligne. Il est donc nécessaire de porter nos algorithmes de traitement sur un FPGA. Le traitement des données en ligne sera effectué par un SOC de type Zynq. Plusieurs méthodes de traitement des signaux devront être évaluées puis implémentées sur le FPGA. L'objectif est d'exploiter des algorithmes suffisamment légers pour intégrer plusieurs dizaines de voies de mesure.

sujet de stage qui est plus orienté sur la conception d'une électronique front-end multivoies basée sur des SiPM pour lire des signaux issus de cette électronique qui devront à terme être traités par le FPGA. Une interaction au quotidien entre les deux sujets est donc attendu.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur 3<sup>ème</sup> année / Master 2

Electronique numérique,  
traitement du signal

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Verilog/VHDL, C,  
Octave/python/R

### ■ Mots clés :

Traitement du signal,  
électronique numérique,  
programmation de FPGA

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

DE IZARRA Grégoire

[gregoire.deizarra@cea.fr](mailto:gregoire.deizarra@cea.fr)

Ce sujet s'articule avec un autre





## Développement d'une électronique front-end multivoies basée sur des SiPM pour lire des fibres optiques couplées à des détecteurs scintillants.

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 optiques qui utilisent des fibres optiques pour transporter les signaux lumineux. Jusqu'à présent nous avons travaillé avec un faible nombre de voies (2 ou 3 maximum) et avons utilisé des modules SiPM disponibles dans le commerce pour les lire. Nous souhaitons maintenant augmenter significativement le nombre de voies de lecture (une dizaine dans un premier temps puis à terme une centaine) et avons donc besoin de développer une électronique de lecture dédiée.

Ce stage consiste à développer et construire un premier prototype d'électronique multivoies basé sur des SiPM. Il s'agira de sélectionner avec soin l'ensemble des composants nécessaires à la réalisation d'une voie de lecture ainsi que l'alimentation et la compensation en température des SiPM. Les premières étapes de conception seront réalisées avec des simulations SPICE puis sur une plaque de prototypage.

Une fois un design validé, il s'agira de concevoir un PCB d'une dizaine de voie de lecture et de préparer sa fabrication chez un partenaire extérieur.

Ce sujet s'articule avec un autre sujet de stage qui est plus orienté sur le traitement des signaux issues des SiPM avec différents algorithmes portés sur un FPGA. Une interaction au quotidien entre les deux sujets est donc attendu.

- Formation souhaitée :  
Ingénieur 3<sup>ème</sup> année / Master 2  
Electronique analogique, optoélectronique
- Durée du stage :  
6 mois
- Méthode/logiciel(s):  
KiCad ou autre plateforme équivalente
- Mots clés :  
Electronique analogique, optronique
- Possibilité de thèse :  
Non
- Contact :  
LLIDO Olivier  
[olivier.llido@cea.fr](mailto:olivier.llido@cea.fr)





## Etude exploratoire d'un dosimètre constitué de xénon piégé sur une zéolithe dopée à l'argent

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.**

Les mesures d'activation par dosimétrie en réacteur sont la principale méthode de détermination de la fluence neutronique. Plusieurs réactions nucléaires pourraient se révéler intéressantes à partir d'isotopes naturels du xénon (<https://theses.fr/api/v1/document/2016AIXM4069>). En outre la réaction  $^{132}\text{Xe}(n,g)$  a déjà été exploitée mais jamais sous forme d'un dosimètre.

Les réactions du xénon avaient été écartées jusqu'à présent en dosimétrie en réacteur du fait de l'impossibilité d'avoir une masse suffisante de xénon dans un container miniature sous pression, le tout en toute sûreté dans un réacteur nucléaire.

Cependant, de très fort progrès ont été récemment réalisés dans le développement de zéolithes dopées à l'argent pour piéger de très fortes quantités de xénon et la conserver à pression et température ambiante (<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jp067630t>).

L'objectif de ce stage est d'évaluer l'ordre de grandeur des réactions nucléaires survenant

dans ce type de zéolithe chargée au xénon.

Les codes d'évolution tel que DARWIN/PEPIN2 ou FISPACT seront utilisés avec un spectre neutronique typique d'un réacteur de recherche.

Le résultat sera couplé à Nucleonica afin d'étudier si les photons émis par l'ensemble des éléments fils rend aisément mesurable (ou non !) les radio-isotopes d'intérêt sur des diodes de mesures de spectrométrie X ou gamma typiques de la plateforme MADERE intégrée au LDCI.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur 3ème année / Master 2

Instrumentation nucléaire, génie atomique, généraliste

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

APOLLO2, FISPAC, C++, Python

### ■ Mots clés :

Dosimétrie en réacteur, simulation, modélisation

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

FAUSSER Clément  
[clement.fausser@cea.fr](mailto:clement.fausser@cea.fr)





## Mesure de température en réacteur nucléaire de recherche par thermocouple : étude par simulation et expérience des paramètres d'influence.

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.**

principalement réalisées avec des thermocouples. Ces thermocouples sont de différentes natures selon, par exemple, qu'ils servent à mesurer la température au cœur même du combustible d'un crayon expérimental ou à mesurer les échauffements nucléaires induits par les particules neutrons ou gamma (calorimétrie).

L'objectif du stage sera à l'aide d'expériences et de simulations (COMSOL) d'établir les principaux paramètres d'influence et d'évaluer leur sensibilité sur la mesure de température.

Il s'agira dans un premier temps de comprendre les spécificités de la mesure par thermocouple en réacteur avec l'ensemble de la chaîne d'acquisition. Dans un deuxième temps, il faudra établir la liste des principaux paramètres d'influence et de proposer une méthodologie permettant d'établir leur sensibilité par simulation et/ou par l'expérience. Enfin, il faudra mettre en œuvre cette méthodologie en réalisant ces simulations et/ou ces expériences et en analyser les résultats obtenus..

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur 3ème année / Master 2

Instrumentation nucléaire, génie atomique, généraliste

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

COMSOL

### ■ Mots clés :

Instrumentation nucléaire, mesures physiques, modélisation

### ■ Possibilité de thèse :

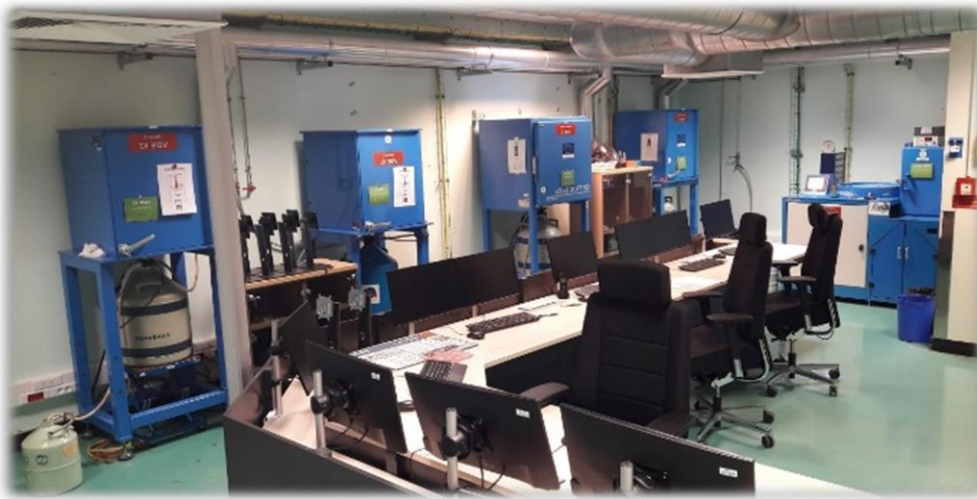
Non

### ■ Contact :

MARTIN Florence

[florence.martin2@cea.fr](mailto:florence.martin2@cea.fr)





# Evolution d'un outil de traitement de la dosimétrie. Définition, développement et validation sur des expériences traitées manuellement

DER/SPES/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.**

Dans le cadre des développements réalisés au LDCI pour la dosimétrie en réacteurs, des données expérimentales et des résultats de traitements sont stockés dans des bases de données relationnelles. Ces bases de données peuvent également faire partie intégrante des méthodologies de traitement et le LDCI a acquis une certaine expertise dans le domaine.

L'équipe dosimétrie a identifié un outil de traitement nécessitant une adaptation pour traiter la dosimétrie des expériences dans le RJH. Cet outil qui s'appuie sur une base relationnelle, assure l'interface et le chainage d'outils de calculs scientifiques. La structure de l'outil est fortement liée à l'expérience pour laquelle il a été conçu.

Le stage consistera donc à proposer des évolutions de l'outil en utilisant les briques logicielles disponibles au LDCI : codes d'activation, codes d'ajustement, plateformes incertitudes. Le déroulement du stage comportera les items suivants :

existant : origine et format des données, liens relationnels, fonctionnalités, besoins du client. L'étudiant analysera l'historique des méthodologies de traitement de la dosimétrie en MTR réalisées au LDCI.

- Evolution de l'outil actuel selon les propositions de l'étudiant. L'outil devra permettre de traiter une grande variété d'expériences avec des données d'entrées d'une grande variabilité.

- Mise en œuvre du nouvel outil sur de anciennes expériences en MTR et comparaison des résultats obtenus.

## ■ Formation souhaitée :

Ingénieur 3ème année / Master 2

Instrumentation nucléaire, génie atomique, généraliste

## ■ Durée du stage :

4 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

SQL, C++, Git, outils de calcul scientifique, linux, outils bureautiques

## ■ Mots clés :

Instrumentation nucléaire, dosimétrie en réacteur, simulation

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

GREGOIRE Gilles

[gilles.gregoire@cea.fr](mailto:gilles.gregoire@cea.fr)

- Analyse de l'outil





# Portage d'une application de dépouillement de données nucléaires en C++.

DER/SPESI/LP2E

**Le réacteur expérimental CABRI est destiné aux études de sûreté en soutien au parc électronucléaire. Dans le cadre de ce programme, le LP2E (Laboratoire de Préparation et Réalisation des Essais) du CEA est en charge de la Préparation, de la Réalisation et du dépouillement des Essais.**

Le département d'étude des réacteurs du CEA Cadarache dispose d'une application de dépouillement de données, nommée OADT, écrite sous Excel en Visual Basic afin d'afficher les principaux résultats liés à l'exploitation du réacteur CABRI.

Bien que fonctionnelle, cette application fonctionnant uniquement sous Windows, nécessite des corrections et des améliorations, telle que l'intégration d'un connecteur vers une base de données partagée sur le réseau. Dans le cadre d'une remise à niveau de cette application offrant un meilleur support pour les utilisateurs, le département a pour projet de porter cette application en C++ afin d'optimiser ses performances dans les calculs et le traitements des données, et de rendre cette application complètement portable et pérenne.

## ■ Formation souhaitée :

Mesures Physique, DUT ou école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Excel, Visual Basic, C++, Qt, Linux, Big Data, Base de données, Réseaux

## ■ Mots clés :

Neutronique, Mesures, Réacteur Nucléaire, Dépouillement, Post-traitements

## ■ Possibilité de thèse :

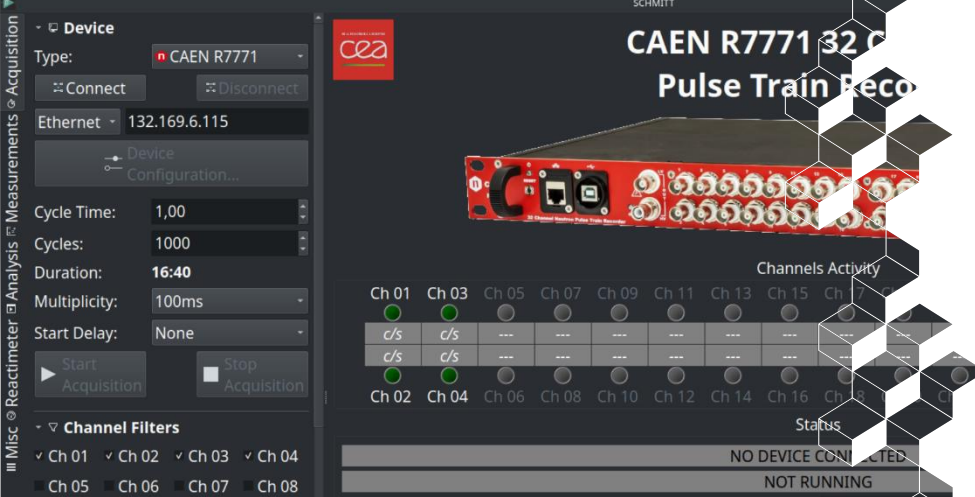
Non

## ■ Contact :

Laurent Pantera  
[laurent.pantera@cea.fr](mailto:laurent.pantera@cea.fr)

Gilles Caulier  
[gilles.caulier@cea.fr](mailto:gilles.caulier@cea.fr)





## Qualification d'un système de mesure de bruit neutronique.

DER/SPESI/LP2E

**Le réacteur expérimental CABRI est destiné aux études de sûreté en soutien au parc électronucléaire. Dans le cadre de ce programme, le LP2E (Laboratoire de Préparation et Réalisation des Essais) du CEA est en charge de la Préparation, de la Réalisation et du dépouillement des Essais.**

Le département d'étude des réacteurs du CEA IRESNE sur le site de Cadarache dispose d'une instrumentation portative dédiée à la mesure du bruit neutronique qui est généré par un réacteur nucléaire en fonctionnement.

Cette instrumentation réalise de longues mesures pour caractériser la physique du réacteur (paramètres cinétiques, niveau de criticité, etc.). Elle réalise des acquisitions en temps réel des flux neutroniques issus de plusieurs détecteurs, analyse les données, et calcule des statistiques utiles pour les exploitants et les physiciens.

Cette instrumentation a été modernisée en 2024 et fera l'objet d'une qualification en laboratoire et sur installation nucléaire de base.

### ■ Formation souhaitée :

Mesures Physique, DUT ou école d'ingénieur

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Python, Matlab, C++, Linux, Big Data

### ■ Mots clés :

Neutronique, Qualification, Mesures, Réacteur Nucléaire

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

Romain Boffy  
[romain.boffy@cea.fr](mailto:romain.boffy@cea.fr)

Gilles Caulier  
[gilles.caulier@cea.fr](mailto:gilles.caulier@cea.fr)





Portabilité d'une Interface  
Homme Machine  
développée en JAVA et le  
logiciel d'analyse de données  
R d'une plateforme  
MSWindows à une  
plateforme Linux et ajout de  
fonctionnalités selon les  
besoins des  
expérimentateurs.

DER/SPESI/LP2E

**Le réacteur expérimental CABRI est destiné aux études de sûreté en soutien au parc électronucléaire. Dans le cadre de ce programme, le LP2E (Laboratoire de Préparation et Réalisation des Essais) du CEA est en charge de la Préparation, de la Réalisation et du dépouillement des Essais.**

Le LP2E a développé en interne un environnement de dépouillement de données expérimentales permettant de faciliter le partage des outils d'analyse élaborés par les expérimentateurs. L'idée du développement logiciel a été de proposer un outil qui soit le plus générique possible pour permettre aux expérimentateurs d'intégrer leur contribution sans un investissement trop important en terme de programmation d'IHM. L'outil a été développé dans un environnement MSWindows. Il utilise le langage JAVA. Un point essentiel de la réalisation a consisté à inclure proprement dans l'IHM JAVA l'outil Open Source d'analyse de données R en utilisant les aspects interactifs des représentations graphiques proposées dans certains packages R. L'objet du stage est de réaliser la portabilité de l'application dans un environnement Linux. Une fois l'intégration effectuée une seconde phase du stage donnera lieu à rendre accessible aux expérimentateurs par cette IHM de nouvelles procédures de dépouillement récemment introduites dans le laboratoire en particulier l'utilisation de scripts qui doivent être exécutés sur un réseau local Spark. Le stagiaire devra prendre soin de respecter les phases de développement applicatif d'un projet informatique, depuis l'étude de l'environnement de travail existant,

les phases de tests, le suivi versioning sous gitlab et la réalisation de la documentation technique.

■ Formation souhaitée :

Ecole ingénieur

Génie informatique, seconde ou dernière année

■ Durée du stage :

6 mois

■ Méthode/logiciel(s):

JAVA, R, SQL

■ Mots clés :

POO, Design Patterns, UML

■ Possibilité de thèse :

Non

■ Contact :

Laurent Pantera

[laurent.pantera@cea.fr](mailto:laurent.pantera@cea.fr)





# Amélioration de l'architecture réseau de la supervision du réacteur expérimental CABRI

DER/SPESI/LEXIC

**Le réacteur expérimental CABRI est destiné aux études de sûreté en soutien au parc électronucléaire. Dans le cadre de ce programme, le LEXIC (Laboratoire d'Exploitation de l'Installation CABRI) du CEA est en charge de la conduite du réacteur, des contrôles et essais périodiques, des travaux de maintenance, de jouvence et de modifications de l'installation.**

CABRI dispose actuellement d'un système de supervision appelé GTC avec différents types de machines qui communiquent via différents réseaux et équipements.

Dans le cadre du remplacement quinquennal des serveurs de la GTC prévu en 2025, le LEXIC envisage d'améliorer l'architecture du réseau GTC afin d'augmenter la disponibilité du système en cas d'agression de type incendie ou séisme et de renforcer la sécurité du réseau en cas d'acte malveillant.

L'objet du stage est de définir la nouvelle architecture et préparer sa mise en œuvre.

Pour cela, au sein de l'équipe instrumentation/contrôle commande de l'installation, le ou la stagiaire doit définir l'aménagement du matériel dans les locaux, configurer tous les équipements et réaliser les tests avant mise en production puis déterminer les opérations/travaux nécessaires à la mise en service et enfin rédiger le programme des essais de bon fonctionnement finaux.

Le ou la stagiaire doit rédiger la documentation nécessaire pour chaque étape du projet (notes techniques de définition, mode opératoire de tests, note technique des opérations/travaux préalables) et mettre à jour la documentation existante si impactée.

## ■ Formation souhaitée :

DUT/BUT GEII parcours AI

Licence Pro SARII

## ■ Durée du stage :

De 10 à 16 semaines

## ■ Méthode/logiciel(s):

## ■ Mots clés :

Supervision, Réseau informatique

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

PIGNOLY Régis

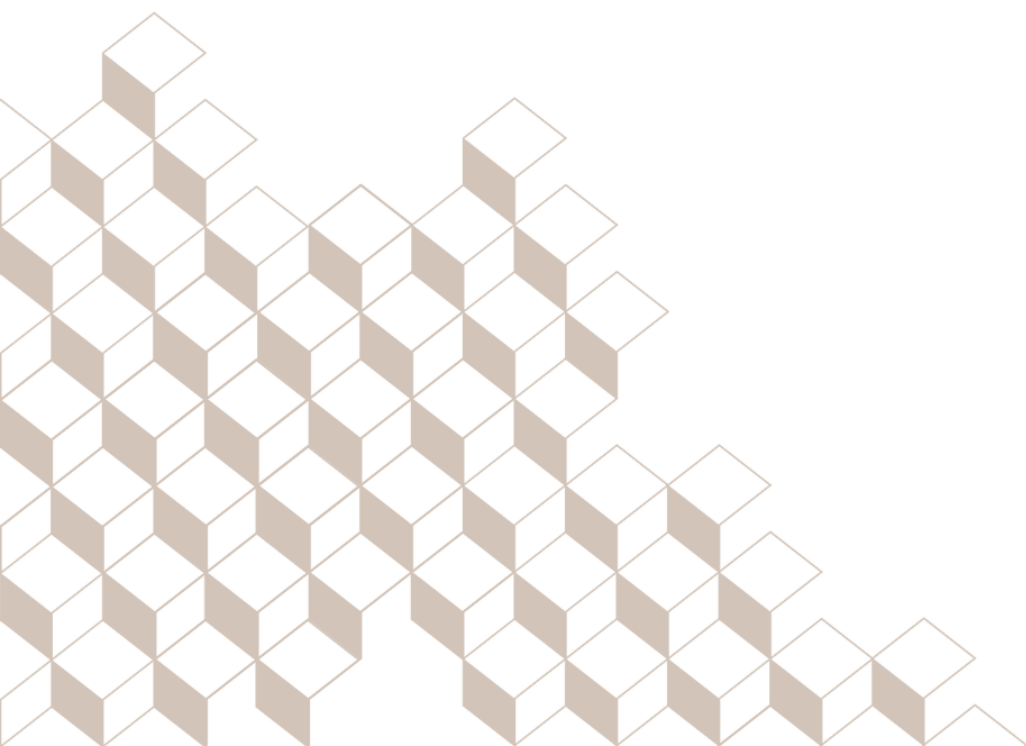
regis.pignoly@cea.fr



# S P R C

Service de physique  
des réacteurs et du  
cycle

*Reactor and Cycle Physics Unit*





# Optimisation de la conception RNR vis-à-vis des services rendus à des parcs nucléaires industriels

DER/SPRC/LE2C – Laboratoire d'Etude des Cœurs et du Cycle

## Thématiques abordées lors de ce stage :

- **Physique du cycle nucléaire :** Travail sur un outil de modélisation des flux de matières dans un parc nucléaire à l'équilibre (réacteurs nucléaires et usines du cycle du combustible associées)
- **Méthode scientifique :** Obtention de nombreux résultats, à interpréter pour mettre en évidence de nouvelles pistes de conception de réacteurs à neutrons rapides (RNR)
- **Développement en Python :** Prise en main du modèle de RNR flexible, et adaptation si nécessaire pour approfondir l'interprétation des résultats

La stratégie française en termes de production électronucléaire consiste à déployer d'ici la fin du siècle des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ces derniers demandent de mettre en place un cycle du combustible avancé, avec traitement-recyclage du plutonium des combustibles usés, pour être exploités

Si les réacteurs de forte puissance sont déployés industriellement en France et dans le monde, de nouveaux acteurs émergent aujourd'hui (startups), avec la proposition de concepts de réacteurs de plus faible puissance, pour des usages parfois non électrogènes (chaleur, hydrogène).

Dès lors, de nombreuses options peuvent être envisagées pour le déploiement dans le futur d'un nucléaire durable : quels réacteurs déployer (quel modèle de REP et de RNR, réacteurs de forte puissance type EPR ou réacteurs modulaires de petite taille) ? Quels types de combustible utiliser (UOX, MOX, autres) ? Quel burn-up cible choisir pour les différents réacteurs du parc ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions en considérant l'ensemble du cycle du combustible, un outil dédié aux études de parcs nucléaires à l'équilibre a été développé au Laboratoire d'Etudes des Cœurs et du Cycle (LE2C). Cet outil, nommé SEPAR, permet d'obtenir les performances d'une flotte de réacteurs en termes de flux de matières nucléaires. Son temps de calcul réduit de l'ordre de la seconde rend possible des calculs d'optimisation afin de converger vers un parc nucléaire optimal selon des objectifs donnés : minimisation de la

consommation de ressources naturelles, minimisation du flux de déchets, etc...

Récemment, un modèle flexible de RNR, codé en Python, a été intégré à SEPAR. Il permet d'utiliser les paramètres de conception du cœur RNR (puissance, temps de cycle, type d'assemblage etc...) comme leviers d'optimisation pour les études de parc à l'équilibre. De cette façon, SEPAR est en mesure d'apporter des tendances de conception.

Le but du stage est d'exploiter ce nouveau modèle afin d'améliorer la conception de RNR, en prenant en compte leur intégration au sein de différents parcs nucléaires. Ces parcs auront différents objectifs en termes de gestion des matières (économie en uranium naturel, reprise de combustibles usés, transmutation de déchets ultimes...). L'intégration d'une faible fraction de RNR dans des parcs REP sera notamment étudiée.

En fonction des caractéristiques du modèle de RNR flexible, les nombreux résultats obtenus seront synthétisés et interprétés, ce qui permettra de mieux comprendre leur optimisation en cycle, et de dégager de nouveaux leviers de conception. La rédaction d'un article dans une revue scientifique pourra être initiée en fonction de l'avancée des travaux.

## ■ Formation souhaitée :

2<sup>ème</sup> année de master ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur dans le domaine du nucléaire, ou formation Génie Atomique

## ■ Durée du stage :

5 - 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

Python, Linux, code de cycle à l'équilibre (SEPAR), Pack Office

## ■ Mots clés :

Cycle du combustible, scénario à l'équilibre, réacteurs à neutrons rapides

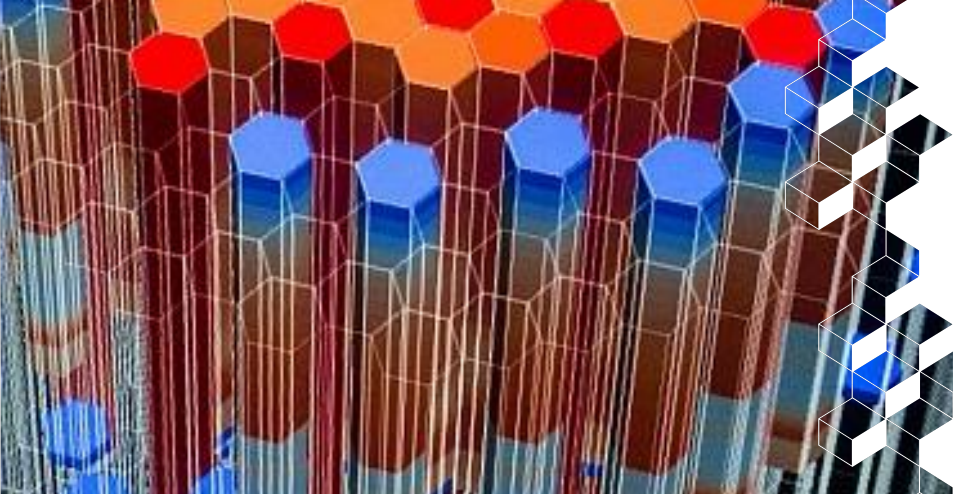
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

[camille.laguerre@cea.fr](mailto:camille.laguerre@cea.fr)  
LAGUERRE Camille





# Détermination de l'impact du suivi de charge sur la composition des assemblages irradiés d'un SMR

DER/SPRC/LE2C – Laboratoire d'Etude des Cœurs et du Cycle

## Thématiques abordées lors de ce stage :

- **Suivi de charge : Etude de profils de suivi de charge réalistes**
- **Réacteur étudié : Modélisation d'un SMR de type REP**
- **Calculs réalisés : Calculs déterministes à l'échelle du cœur avec le code APOLLO3 pour déterminer des bilans matière en fin d'irradiation**

L'augmentation de la part d'énergies intermittentes dans un mix électrique génère un besoin de flexibilité afin d'être en mesure de gérer les excès et les manques de production. Dans le cas d'un mix fortement nucléarisé comme le mix français, plusieurs réacteurs peuvent réaliser du suivi de charge, c'est-à-dire que leur puissance est ajustée au cours du temps afin de maintenir l'équilibre entre la production totale d'électricité et sa consommation. Les opérations de suivi de charge sont réalisées en suivant des règles précises afin de garantir le fonctionnement sûr du cœur : rampe de puissance limitée, nombre de variations de puissance contraint, suivi de charge non autorisé en fin de cycle etc...

Le suivi de charge implique donc des variations des conditions d'irradiation au cours du temps : niveau et répartition spatiale du flux, position des absorbants, température du combustible et du modérateur... Ces changements pourraient avoir des répercussions sur le taux de combustion (ou burn-up) effectivement atteint par les assemblages avant déchargement, et donc sur leur composition isotopique finale. La connaissance de la variabilité du bilan matière des combustibles irradiés représente un intérêt majeur pour la gestion des matières sur le long terme, notamment dans le cadre de la stratégie future de multi-recyclage du combustible.

étudié sur le cœur PRATIC (Petit Réacteur Académique pour Tester, Innover & Concevoir), qui est une image neutronique d'un petit réacteur modulaire (SMR) de type REP. Le suivi de charge se fera dans un premier temps à l'aide d'un pilotage en eau claire puis dans un second temps, si possible, en eau borée. Les SMR étant présentés comme une solution de flexibilité pour le nucléaire, il semble pertinent d'évaluer les effets de cette flexibilité attendue sur le bilan matière.

La modélisation de PRATIC s'effectuera à l'aide du code déterministe APOLLO3. Différents types de suivi de charge devront être testés et comparés au fonctionnement nominal : suivi jour/nuit, suivi aléatoire, modélisation d'arrêts au cours du cycle etc... On quantifiera alors l'impact de ces différents suivis de charge sur le bilan matière. En particulier, on comparera les variations de bilan matière assemblage par assemblage ainsi que la répartition axiale des noyaux.

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.

Lors de ce stage, l'effet d'une variation du facteur de charge sera

## ■ Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur dans le domaine du nucléaire, ou formation Génie Atomique

## ■ Durée du stage :

5 – 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, Pack Office

## ■ Mots clés :

SMR, REP, suivi de charge, calculs déterministes

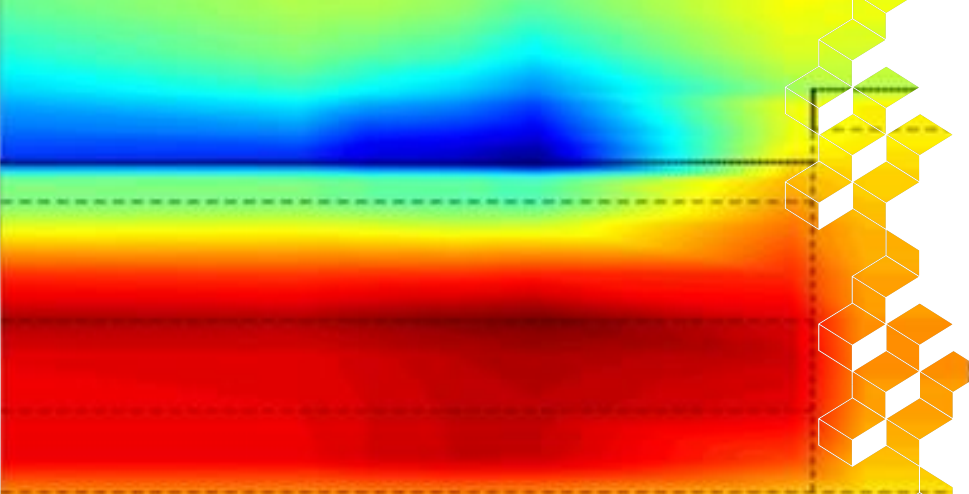
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

aimerice.eustache@cea.fr  
EUSTACHE Aimeric et TIREL Kevin  
kevin.tirel@cea.fr





## Etudes neutroniques de caractérisation d'un cœur de RNR- Na innovant

DER/SPRC/LE2C

**Dans le cadre de la recherche sur la filière des RNR-Na, le CEA propose un stage visant à réaliser les études neutroniques d'évaluation d'un cœur innovant de 4ème génération. L'objectif de ce nouveau concept est de garantir un faible effet de vidange sur une longue durée de cycle et quelle que soit la hauteur fissile.**

La filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) a été lancée en France dans les années 1960 à l'instar de RAPSODIE, PHENIX ou encore SUPERPHENIX. Afin de respecter des contraintes de sûreté toujours plus importantes en lien avec les critères de la Gen-IV, la recherche sur cette filière de réacteurs continue encore aujourd'hui au CEA.

Certains de ces réacteurs sont conçus de manière à garantir une sûreté accrue en vérifiant un effet de vidange négatif, même dans des conditions accidentelles très défavorables : c'est le concept CFV (Cœur à Faible effet de Vidange). Cette innovation ne permet cependant pas de répondre à la problématique de tous les cœurs car sa hauteur fissile se trouve limitée ainsi que sa longueur de cycle. Dans ce contexte, le stage propose de définir et d'optimiser un nouveau concept de cœur, qui permettrait de se libérer de ces deux contraintes tout en conservant des performances proches du concept CFV. La caractérisation précise de ce concept ainsi que ses limites sont encore à évaluer.

Le stage peut donc se définir autour de deux objectifs principaux. D'une part, le stagiaire devra réaliser l'analyse physique de ce nouveau cœur par le biais d'études de sensibilité tout en comparant ses résultats avec les performances et les critères de sûreté intrinsèques au CFV. D'autre part, il contribuera au

développement de l'outil INCA en l'étoffant avec les travaux réalisés durant le stage. Enfin et en fonction de l'avancement du stage, l'étudiant pourra s'appuyer sur les résultats de ses études pour proposer des pistes d'amélioration du concept.

Pour ce faire, le stagiaire devra prendre en main plusieurs outils.

- Apollo3, code de neutronique déterministe développé au CEA et qui permet de modéliser diverses configurations de cœurs en évolution, en fonctionnement nominal ou accidentel.
- INCA, l'interface Python entre l'utilisateur et le code Apollo3, principalement utilisée pour la construction des géométries de calculs, la définition des matériaux et l'application de schémas de calculs déterministes adaptés à la physique des RNR-Na.
- TRIPOLI4, code stochastique permettant de mener des études de validation numérique.

Le profil du candidat est le suivant : un étudiant en dernière année d'école d'ingénieur ou équivalent M2, maîtrisant les fondamentaux de la physique des réacteurs et de la neutronique et ayant une appétence particulière pour la compréhension physique des phénomènes et le développement de code en Python.

### ■ Formation souhaitée :

Equivalent Master 2

### ■ Durée du stage :

5 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Python, Apollo3, INCA, TRIPOLI4

### ■ Mots clés :

GenIV, Conception cœur, RNR-NA, neutronique, effet de vidange

### ■ Possibilité de thèse :

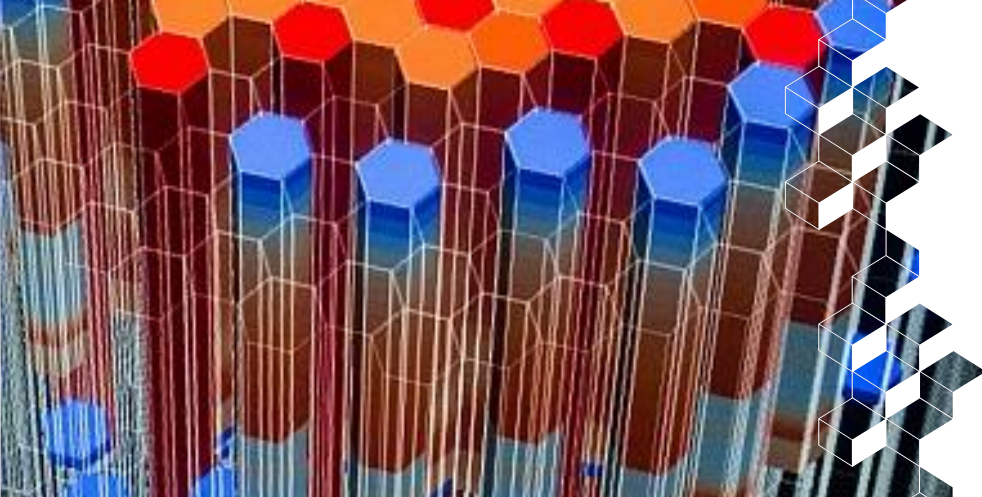
Non

PE TITEAU Vincent

Contact :

Vincent.petiteau@cea.fr





## Mise en données du parc nucléaire européen pour les études de scénarios

DER/SPRC/LE2C – Laboratoire d'Etude des Cœurs et du Cycle

### Thématiques abordées lors de ce stage :

- **Extraction de données réacteurs depuis la base PRIS de l'AIEA**
- **Familiarisation avec la modélisation de scénarios électronucléaires**

Dans un monde où le nucléaire fait parti des solutions reconnues pour atteindre les objectifs de décarbonation de l'union européenne, disposer d'une modélisation de l'ensemble des réacteurs du parc européen semble essentiel afin de réaliser des projections crédibles. Ces projections sont le résultat de calculs de scénarios électronucléaires. Dans ces calculs, l'intégralité des infrastructures nécessaires au bon fonctionnement des réacteurs nucléaires est prise en compte : extraction des minerais, usines de conversion et d'enrichissement, usines de fabrication de combustibles, usines de retraitement, réacteurs, stockages, usines de conditionnement des déchets. Le CEA réalise depuis plusieurs années des calculs de scénarios à l'échelle du parc français en collaboration avec les grands industriels du secteur. En revanche, aucun calcul n'a encore été effectué à l'échelle européenne.

L'objectif de ce stage est de contribuer à la construction de scénario électronucléaire européen. Une première étape est l'obtention de données fiables pour modéliser l'historique du parc européen. Le stagiaire devra proposer une solution efficace d'exploitation de données ouvertes concernant le parc européen en vue de leur utilisation dans de futurs calculs de scénarios. Plus précisément, le stagiaire devra mettre en place une méthode d'extraction de données issues de la base PRIS de l'AIEA. Cette méthode devra fournir des données facilement exploitables pour réaliser des calculs de scénarios et permettre leur actualisation dans le futur.

Le candidat devra être à l'aise avec l'environnement UNIX et le langage Python, et faire preuve d'intérêt pour le domaine de l'énergie, et plus particulièrement celui du nucléaire.

#### ■ Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> année de licence

Ou 1<sup>ère</sup> année d'école d'ingénieurs

#### ■ Durée du stage :

2 – 3 mois

#### ■ Méthode/logiciel(s):

Python

#### ■ Mots clés :

Réacteur nucléaire, Europe, scénario, base de données

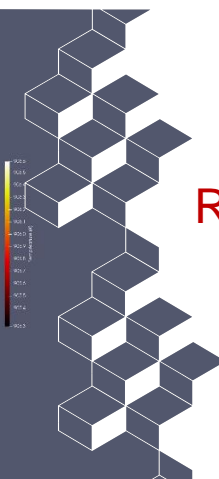
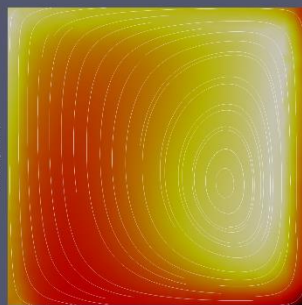
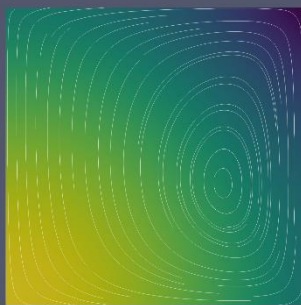
#### ■ Possibilité de thèse :

Non

#### ■ Contact :

kevin.tirel@cea.fr  
TIREL Kevin et EUSTACHE Aimeric  
aimerice.eustache@cea.fr





# Étude de l'impact du couplage neutronique-thermohydraulique en Réacteur à Sels Fondus : de la maquette critique au démonstrateur

DER/SPRC/LE2C

Les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération ont notamment pour objectif la réduction des inventaires de déchets radioactifs. Le concept de réacteur à sels fondus (RSF) fait partie des concepts retenus par le forum GEN IV et est actuellement étudié par le CEA dans l'optique de diminuer l'emprise du stockage géologique profond par l'incinération des principaux actinides mineurs (Np, Am, Cm).

Un concept de RSF à sels chlorures de faible puissance a été pré dimensionné dans l'optique d'être intégré dans un parc électronucléaire. La construction d'un tel réacteur nécessitera une validation à plusieurs niveaux par la simulation et l'expérience.

Une maquette critique / réacteur d'essais permettra notamment d'étudier le couplage neutronique-thermohydraulique à échelle réduite et de valider la modélisation du concept pré dimensionné.

L'objectif du stage consistera donc à étudier l'impact de ce couplage de la maquette critique au démonstrateur RSF avec l'identification d'éventuels effets d'échelle. Le déroulement du stage est prévu comme suit :

- Bibliographie sur le concept de réacteur à sels fondus
- Sélection des variables d'intérêt des études couplées et des objets d'étude
- Réalisation de calculs neutroniques statiques puis de calculs couplés neutronique-thermohydraulique
- Évaluation de l'impact des effets observés sur le concept pré dimensionné

suivantes pourront être étudiées :

- Réalisation de transitoires de puissance et de réactivité
- Revue de l'instrumentation disponible vis-à-vis de l'amplitude des phénomènes observés et évaluation de l'impact de l'instrumentation sur la conception

Ce stage permettra au candidat ou à la candidate de développer son sens physique en se penchant sur la neutronique et la thermohydraulique d'un réacteur à combustible liquide circulant et sa modélisation. Nous recherchons un-e candidat-e en M2 ou école d'ingénieur avec une affinité prononcée pour la conception de réacteur.

## ■ Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Code Monte-Carlo, Code de thermohydraulique, Unix, Python

## ■ Mots clés :

Neutronique, thermohydraulique, physique des réacteurs

## ■ Possibilité de thèse :

Non

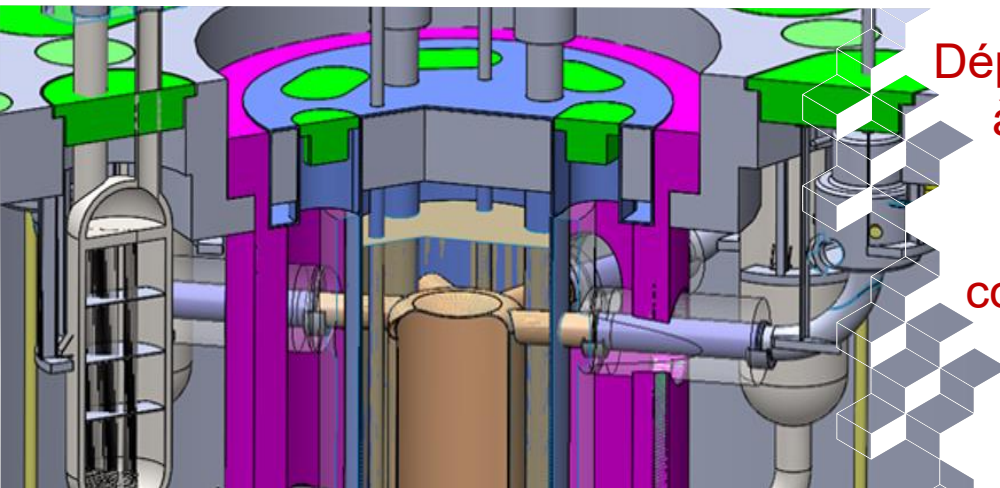
## ■ Contact :

Laura MESTHIVIERS

[laura.mesthiviers@cea.fr](mailto:laura.mesthiviers@cea.fr)

En fonction de l'avancée du candidat ou de la candidate, les thématiques





# Déploiement d'un réacteur à sel fondu transmutateur d'actinides mineurs : Impact sur le cycle et comparaison avec l'AMR ARAMIS

DER/SPRC/LE2C

**Les actinides mineurs étant les principaux contributeurs à long terme de la radiotoxicité des déchets nucléaires, réduire leur inventaire constitue un des enjeux de la quatrième génération de réacteur nucléaire. Sachant que le concept de réacteur à sels fondus fait partie des concepts retenus par le forum GEN IV, le CEA participe activement à la conception de réacteurs à sels fondus dédiés à l'incinération des actinides mineurs (Np, Am, Cm).**

Un réacteur à sel fondu (RSF) avec un sel combustible à base chlorure a été pré dimensionné avec une faible puissance. Les performances du cœur ont été évaluées à travers un déploiement du concept au sein d'un parc électronucléaire afin de caractériser l'apport des RSFs sur le cycle.

L'objectif du stage consistera à appliquer la même démarche sur un réacteur de plus forte puissance afin d'évaluer les performances d'incinération atteignables et la réduction de l'emprise au stockage des déchets à haute radioactivité et vie longue. Le déroulement du stage est prévu comme suit:

- Bibliographie sur le concept de réacteur à sels fondus et sur la configuration de référence
- Elaboration d'un modèle de fabrication et d'irradiation du sel combustible
- Réalisation de calcul de scénario pour le déploiement du réacteur de plus forte puissance dans un parc électro nucléaire.
- Évaluation des inventaires en actinides mineurs et capacités des usines du cycle.
- Comparaison avec la configuration de référence

ou de la candidate les thématiques suivantes pourront être étudiées :

- Détermination de l'emprise au stockage des déchets de la nouvelle configuration
- Développement d'un nouveau modèle de fabrication basé sur des réseaux de neurones

Les travaux de ce stage pourraient déboucher sur la rédaction d'un article de journal.

Ce stage permettra au candidat ou à la candidate de développer son sens physique en se penchant sur la neutronique et la physique du cycle d'un réacteur à combustible liquide circulant et sa simulation. Nous recherchons un candidat ou une candidate en M2 ou école d'ingénieur avec une affinité prononcée pour la conception de réacteur.

## ■ Formation souhaitée :

M2 ou école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Code de scénario, Code Monte-Carlo, Unix, Python, Microsoft office,

## ■ Mots clés :

Neutronique, physique du cycle du combustible , physique des réacteurs

## ■ Possibilité de thèse :

Non

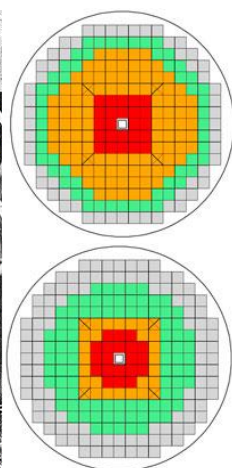
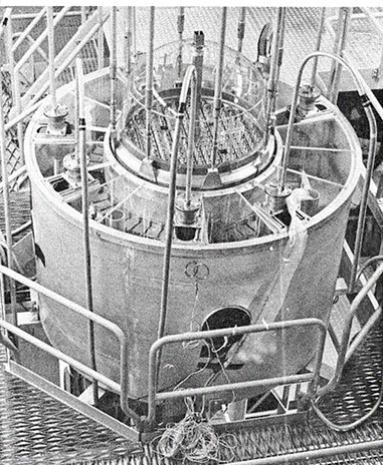
## ■ Contact :

Camille LAGUERRE

camille.laguerre@cea.fr

En fonction de l'avancée du candidat





- Oscillator element
- Fuel, inner region
- Fuel, outer region
- Safety element
- Lead
- Graphite

## Analyse neutronique de l'expérience STEK pour la validation des outils de calcul scientifique.

DER/SPRC/LEPh

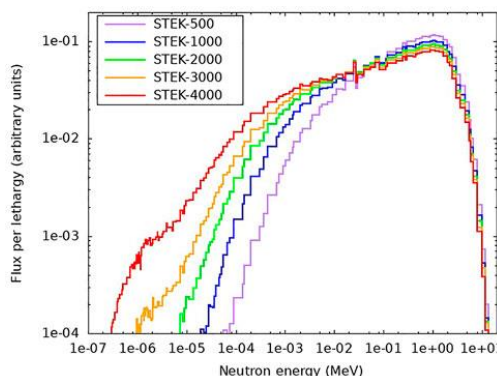
**Ce stage offre une opportunité de réexaminer l'expérience STEK, dans une démarche de validation et quantification des incertitudes avec des outils de calcul scientifique (OCS) de dernière génération. Ce stage contribuera à la validation des données nucléaires des produits de fission vers le développement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires.**

L'installation STEK a été construite vers 1970 dans le cadre de la coopération sur le développement de réacteurs surgénérateurs rapides. L'objectif principal était de réaliser des mesures intégrales de sections efficaces des produits de fission. Ces sections efficaces ont été déterminées à partir de mesures de réactivité centrale, en utilisant une technique d'oscillateur. Le réacteur à puissance nulle se composait d'une zone de spectre thermique à l'extérieur et d'un centre interne du cœur à spectre rapide.

STEK a été historiquement utilisée pour améliorer et valider les évaluations de données nucléaires des produits de fission. La précision des bibliothèques de données nucléaires existantes, telles que ENDF/B ou JEFF, dans des conditions de spectres rapides peut être quantifiée. Cela est essentiel pour renforcer la fiabilité des simulations des réacteurs nucléaires.

Ces dernières années, on observe un regain d'intérêt pour les conditions de spectre rapide en raison de leur pertinence dans les conceptions de réacteurs de nouvelle génération et de cycles de combustible avancés. Le ré-examen des données STEK s'inscrit dans cette mouvance et répond au besoin croissant de données nucléaires précises dans de telles conditions.

Pendant ce stage, l'étudiant sera chargé d'utiliser à la fois des codes stochastiques (TRIPOLI-4®) et déterministes (APOLLO-3®), et ces résultats seront comparés aux données expérimentales. En outre, une analyse de sensibilité et une quantification de l'incertitude seront réalisées pour évaluer la robustesse des simulations. Une analyse de la représentativité de l'expérience STEK par rapport aux conditions actuelles des réacteurs à spectre rapide sera entreprise, ainsi qu'une évaluation de leur transposition pour les applications modernes. Ce travail permettra de contribuer de manière significative à la validation des sections efficaces des produits de fission et leur incertitude.



### ■ Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> année école d'ingénieur nucléaire

Master 2 nucléaire

### ■ Durée du stage :

5-6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Neutronique, python

TRIPOLI4- APOLLO3

### ■ Mots clés :

RNR - OCS – Réacteur expérimental

### ■ Possibilité de thèse :

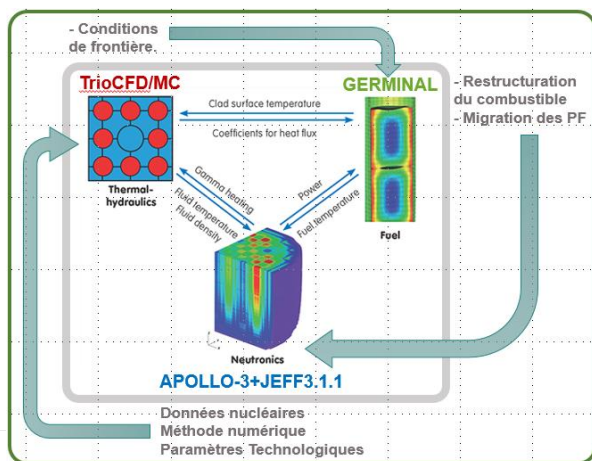
Non

### ■ Contact :

GARCIA CERVANTES Elias Y.

Elias-Yammir.GARCIA-CERVANTES@cea.fr





# Quantification des incertitudes dans la modélisation multiphysique de réacteurs

DER/SPRC/LEPh

Le sujet se focalise sur la modélisation multi-physique avec des outils de calcul scientifique (OCS) et la quantification d'incertitudes associées. Plusieurs méthodes seront testées pour établir un schéma optimal, cela inclut l'expansion du chaos polynomial et la modélisation par substitution (méta-modèles).

Le sujet de stage se focalise sur la modélisation multiphysique de réacteurs nucléaires, avec un accent sur la quantification des incertitudes. Ce travail permettra d'aborder des recherches de pointe jouant un rôle crucial dans la sûreté, l'efficacité et la fiabilité des systèmes d'énergie nucléaire.

La modélisation multiphysique revêt une importance capitale car elle reconnaît l'interaction complexe de plusieurs phénomènes physiques au sein de systèmes couplés, nous permettant ainsi d'obtenir une compréhension globale de leur comportement. Les simulations multiphysiques nous permettent de saisir les subtilités du monde réel que les modèles à physique unique ont souvent tendance à négliger. En intégrant des éléments tels que la dynamique des fluides, le transfert de chaleur, et la neutronique, les modèles multiphysiques fournissent un cadre complet pour prédire comment les systèmes réagissent à différentes conditions et forces.

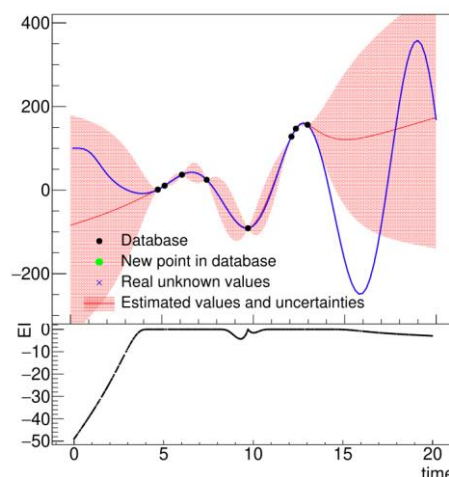
Cette approche contribue à optimiser les conceptions et à stimuler l'innovation en traitant les défis multifacettes inhérents au paysage technologique d'aujourd'hui.

La quantification des incertitudes dans les simulations multiphysiques représente un défi. En raison de la nature intrinsèquement complexe des systèmes multiphysiques, de nombreuses sources d'incertitudes peuvent se superposer, allant des données d'entrées imparfaites aux

approximations dans les modèles mathématiques eux-mêmes. De plus, la propagation de ces incertitudes à travers les interactions multiphysiques complexes peut rendre la tâche encore plus ardue.

L'objectif du stage consiste à tester diverses méthodologies en vue de définir un schéma générique et optimisé pour quantifier ces incertitudes. Ces méthodologies incluent l'expansion du chaos polynomial, de la modélisation des ordres réduits, « multi-level Monte Carlo », et de la modélisation de substitution (méta-modèles) pour permettre l'analyse de la sensibilité et la quantification des incertitudes. Il sera possible d'identifier et de classer les paramètres d'entrées par leur sensibilité aux sorties du système, quel que soit son domaine physique.

Ces méthodologies seront testées



## Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> année école d'ingénieur nucléaire

Master 2 nucléaire

## Durée du stage :

5-6 mois

## Méthode/logiciel(s):

Neutronique, python

TRIPOLI4 - APOLLO3

## Mots clés :

RNR - OCS – Réacteur expérimental

## Possibilité de thèse :

Oui

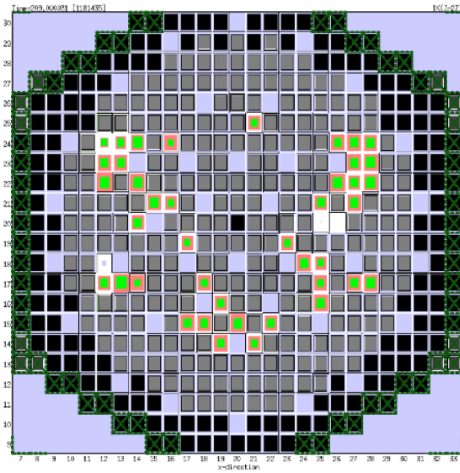
## Contact :

GARCIA CERVANTES Elias Y.

Elias-Yammir.GARCIA-CERVANTES@cea.fr

# Validation des calculs neutroniques de configurations dégradées au cours d'accidents graves de cœurs rapides sodium

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 stage, intervient comme soutien au LMAG pour la mise en œuvre du code APOLLO3® dans la plate-forme afin d'améliorer les calculs neutroniques.

Lors de la première phase d'un accident de réactivité sur les réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium, lorsque les éléments combustibles sont encore intègres, les méthodes déterministes de résolution de l'équation du transport des neutrons utilisées dans la phase stationnaire précédente restent valables et les résultats déjà obtenus avec le code APOLLO3® à cette étape s'avèrent satisfaisants.

Au cours de la progression dans le transitoire, 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... La validité et la précision de ces méthodes peuvent être remises en question dans ces phases avancées et doivent donc être évaluées. Ce projet de stage propose de quantifier le biais éventuel introduit par le schéma de calcul neutronique basé sur APOLLO3® lorsqu'on calcule ces situations dégradées. Il est proposé d'aborder cette question en établissant des comparaisons à des résultats de référence obtenus par le code Monte-Carlo TRIPOLI-4®, pour différentes distributions de matériaux représentatives de ces situations.

La première partie du travail consistera à prendre en main la plate-forme SEASON/SIMMER-V pour effectuer une simulation et un post-traitement d'accidents graves. L'objectif est de se familiariser avec le système de calcul actuel et de générer des situations de réacteurs dégradées en 3D pour définir les points de comparaison APOLLO3® vs. TRIPOLI-4®.

La deuxième partie du travail consistera à interfacer la sortie SEASON/SIMMER-V (format hdf5) avec les entrées des codes APOLLO3® et TRIPOLI-4® qui possèdent des conventions de maillage et de distribution de matériaux différentes.

La troisième partie consistera à réaliser la comparaison proprement dite, à effectuer l'analyse et la synthèse des résultats, et à définir des pistes d'améliorations futures.

## ■ 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, Environnement Linux et Windows

## ■ Mots clés :

Neutronique, RNR sodium, Accidents Graves, APOLLO3

## ■ Possibilité de thèse :

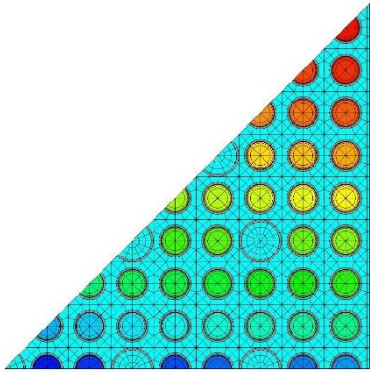
Non

## ■ Contact :

VIDAL Jean-François

jean-francois.vidal@cea.fr





## Mise en œuvre et validation de schémas de calcul neutronique double niveau dans le code APOLLO3

DER/SPRC/LEPh

**Le stage proposé s'inscrit dans le cadre des travaux de mise au point et de validation du code de neutronique APOLLO3® du CEA pour le calcul industriel des REP.**

Les chaînes de calcul industrielles des cœurs reposent pour les calculs d'assemblages combustibles sur des schéma double niveau réalisés avec le code de neutronique déterministe APOLLO2 du CEA.

Les partenaires industriels prévoient de basculer à l'horizon 2030 sur la nouvelle génération de code APOLLO3® pour bénéficier de méthodes numériques plus avancées. Il s'agit dans un premier temps d'évaluer les performances d'APOLLO3® en termes de résultats et de temps de calcul vis-à-vis des calculs APOLLO2 existants.

Le stage proposé consiste dans sa première partie à transposer le schéma double niveau dans APOLLO3® (phase de mise au point). Ce schéma basé sur une approche à deux niveaux énergétiques permet un bon compromis coût/précision par rapport au schéma à un seul niveau « SHEM-MOC » qui constitue l'actuelle référence pour les calculs déterministes mais qui s'avère nettement plus coûteux.

La deuxième partie (phase de vérification/validation) sera consacrée à la comparaison des deux générations de codes et des deux types de schéma double niveau et SHEM-MOC sur un ensemble d'assemblages et de configurations représentatives des REP

(notamment en présence de divers types d'absorbant : gadolinium, B4C, AIC).

En fonction des résultats obtenus (phase d'analyse), des améliorations de schéma pourront être étudiées afin d'ouvrir la voie à des travaux de thèse qui revisiteront également le schéma de référence SHEM-MOC actuel.

### ■ Formation souhaitée :

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

### ■ Durée du stage :

5-6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Python, APOLLO2 et/ou APOLLO3 (facultatif)

### ■ Mots clés :

Neutronique, REP, APOLLO2, APOLLO3, ODYSSEE, validation

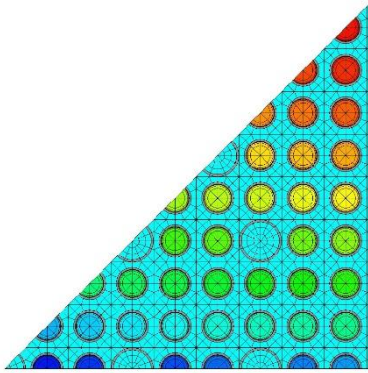
### ■ Possibilité de thèse :

oui

### ■ Contact :

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





## Validation numérique du code APOLLO3® à l'aide de codes open

**source**  
DER/SPRC/LEPh

Dans le cadre du développement du code de modélisation neutronique déterministe APOLLO3®, le CEA mène des travaux de Vérification et Validation afin de s'assurer du bon fonctionnement et des performances. Parmi les différentes options disponibles, la validation numérique consiste à comparer les résultats obtenus par différents codes modélisant le même objet. Dans ce cadre, l'objectif du stage est de comparer les résultats obtenus avec APOLLO3® et des codes open source qui offrent des fonctionnalités similaires.

### Introduction :

L'objectif de ce stage est de contribuer à la validation du code APOLLO3® via la comparaison avec des codes open source qui offrent des fonctionnalités similaires.

APOLLO® est un code multi filières qui offre la possibilité d'effectuer des modélisations neutroniques avancées. Il contient plusieurs solveurs qui reposent sur différentes approximations. Parmi eux le solveur TDT, utilise la méthode des caractéristiques (MOC). D'autres codes à l'international, comme par exemple openMOC développé au MIT, permettent d'effectuer des modélisations avec une méthode similaire.

La première partie de ce stage sera donc dédiée à une recherche bibliographique des codes open source disposant de fonctionnalités analogues à celles présentes dans APOLLO3®. Une fois choisis les codes les plus intéressants, la seconde partie sera dédiée à la définition et ensuite à la simulation d'un cas commun avec ces différents codes. Cette phase permettra de mettre en évidence les différentes possibilités de modélisation offertes par des codes qui reposent sur des approximations proches. En plus, la définition et la conversion des différentes données nécessaires aux simulations permettra de faire un retour sur l'ergonomie des différents codes qui pourra être capitalisé par la suite. Les résultats ainsi obtenus seront enfin analysés en termes de précision et performance afin de fournir des références et de proposer des axes d'amélioration.

### Objectifs du Stage :

#### 1. Etude bibliographique

Comprendre le fonctionnement du code APOLLO3®.

Identifier les alternatives open source qui offrent des fonctionnalités similaires.

#### 2. Modélisation neutronique :

Définir des cas tests communs, mettre au point des modélisations équivalentes et définir des grandeurs d'intérêt.

#### 3. Analyse et synthèse des résultats :

Comparer les résultats des simulations en termes de précision et performances.

#### ■ Formation souhaitée :

- Master en physique
- Ecole d'ingénieur

#### ■ Durée du stage :

- 6 mois

#### ■ Méthode/logiciel(s) :

- Apollo3®, OpenMOC, OpenMC
- Python, C++

#### ■ Mots clés :

- Validation, vérification, simulation, neutronique.

#### ■ Possibilité de thèse :

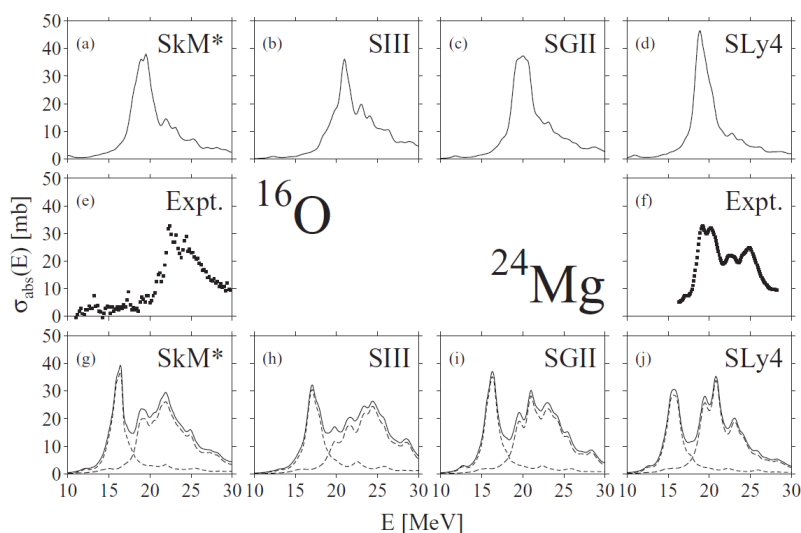
Oui

#### ■ Contact :

VALOCCHI Giorgio

giorgio.valocchi@cea.fr





The FIFRELIN code [1] simulates the prompt component of the de-excitation process. The methods are based on phenomenological models associated with macroscopic and/or microscopic ingredients. Input data can be provided by experiment as well as by theory. The fission fragment de-excitation can be performed within Weisskopf (uncoupled neutron and gamma emission) or Hauser-Feshbach (coupled neutron/gamma emission) statistical theory.

The FIFRELIN code [1] has been successfully applied for the precise modelling of the gamma cascades in gadolinium isotopes in the context of the STEREO experimental program for testing the hypothetical existence of a sterile neutrino in the eV mass range [2]. Recently, as precise as possible gamma cascades have been calculated for germanium isotopes for accurately calibrate cryogenic detectors with nuclear recoils in the 100 eV–1 keV energy range (CRAB project: Calibrated Recoils for Accurate Bolometry) [3].

In order to perform these calculations, the code requires detailed information about the electromagnetic transitions among nuclear states. These can be calculated either using phenomenological approaches [4] or microscopic ones based on effective nuclear interactions [5]. The goal of this project is to perform a series of sensitivities studies by changing various nuclear structure input in order to assess their impact on the resulting gamma cascade via the FIFRELIN code.

In particular, the student will focus on the study of photo-absorption cross section of the Germanium isotopes using the QFAM method developed at CEA [4].

[1] Litaize, O., Serot O., and Berge L. "Fission modelling with FIFRELIN." *The European Physical Journal A* 51.12 (2015): 177.

[2] Almazán, H., et al. "Improved FIFRELIN de-excitation model for neutrino applications." *The European Physical Journal A* 59.4 (2023): 75.

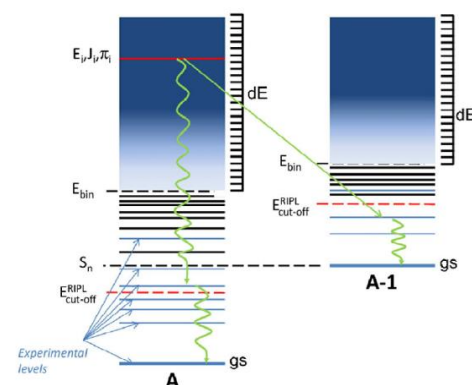
[3] Soum-Sidikov G. et al., *Phys. Rev. D* 108, 072009 (2023)

[4] Capote, R., et al. "RIPL-reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluations." *Nuclear Data Sheets* 110.12 (2009): 3107-3214.

[5] Beaujeault-Taudière, Y., et al. "Zero-and finite-temperature electromagnetic strength distributions in closed-and open-shell nuclei from first principles." *Physical Review C* 107.2 (2023): L021302.

## Microscopic nuclear structure models to study de-excitation process in nuclear fission

DER/SPRC/LEPh



### ■ Formation souhaitée :

Master 2 ou dernière année d'Ecole d'ingénieur en Physique (Nucléaire)

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

C++ / Python

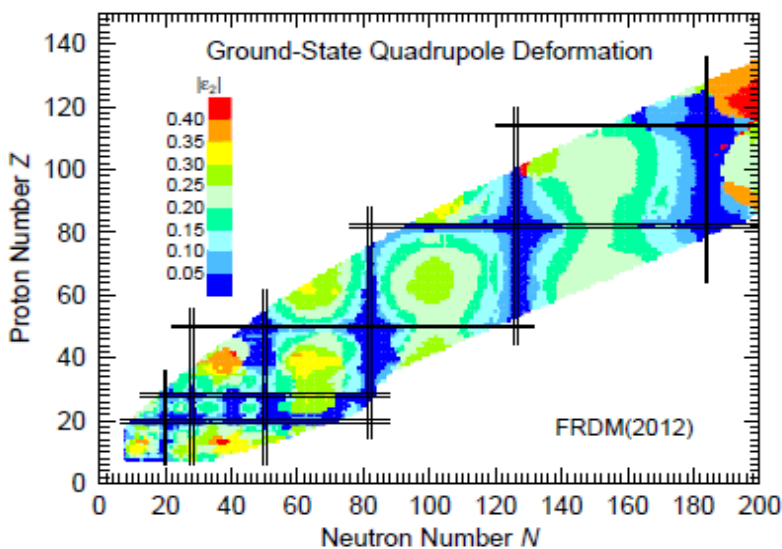
### ■ Mots clés :

Simulation, physique théorique

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

Pastore Alessandro / Frosini  
Mikael / Litaize Olivier  
Contact :  
[alessandro.pastore@cea.fr](mailto:alessandro.pastore@cea.fr)  
[mikael.frosini@cea.fr](mailto:mikael.frosini@cea.fr)  
[olivier.litaize@cea.fr](mailto:olivier.litaize@cea.fr)



Le modèle de masse FRLDM a été développé au fil des ans par Möller et ses collaborateurs [1] afin de reproduire les masses nucléaires. À ce jour, le modèle est l'un des meilleurs à atteindre une précision de 600 keV. Dans le FRLDM, l'énergie de liaison nucléaire est formée de deux composantes : une composante macroscopique (basée sur une formule généralisée de goutte liquide) et une composante microscopique prenant en compte divers effets quantiques tels que les effets de couches, l'appariement et les couplages particule/vibration.

Pour utiliser le modèle FRLDM, il faut paramétrer la forme du noyau nucléaire [2].

Dans sa version originale, la paramétrisation de la forme adoptée suppose une symétrie axiale qui n'est pas bien adaptée pour décrire les noyaux présentant de très grandes déformations.

Afin d'améliorer le modèle, une paramétrisation de forme différente basée sur la transformée de Fourier a été développée [3] et mise en œuvre pour décrire la composante macroscopique. L'objectif de ce projet est de contribuer à l'implémentation de la partie macroscopique dans un code développé au CEA et d'implémenter et d'évaluer la partie microscopique.

L'étudiant mettra ainsi en œuvre la « correction de Strutinsky » et résoudra également les équations BCS afin de prendre en compte les effets superfluides. Bien que ces effets aient déjà été présentés dans le travail original de Möller, ils n'ont pas encore été étendus au cas où il n'y a pas de symétrie axiale. Une fois le modèle entièrement testé et comparé aux résultats publiés, l'étudiant effectuera diverses études de sensibilité, en agissant sur différentes composantes du modèle lui-même afin d'identifier les

améliorations possibles. Compte tenu de la forte composante numérique, il est demandé à l'étudiant d'avoir un bon niveau de codage, éventuellement dans des langages orientés objet tels que C++.

Dans la thèse à suivre, l'étudiant travaillera à une nouvelle optimisation des paramètres du modèle et utilisera les outils statistiques nécessaires pour identifier les corrélations entre eux. L'objectif est d'utiliser les outils les plus adaptés dérivés de l'IA afin d'accélérer et d'automatiser le processus.

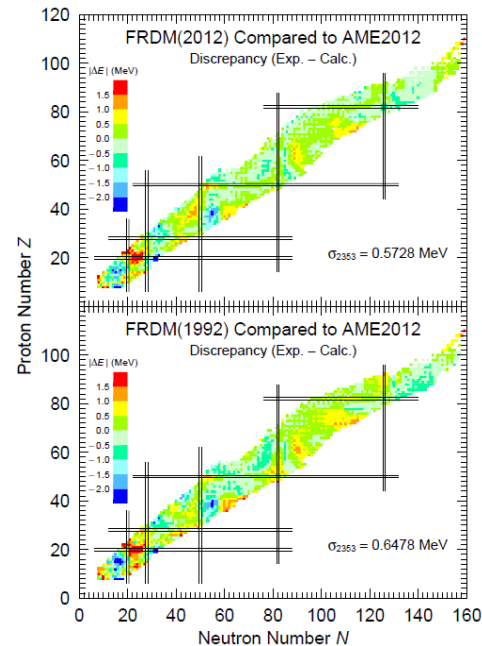
[1] Möller, P., et al. "Nuclear ground-state masses and deformations: FRDM (2012)." *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 109 (2016): 1-204.

[2] Tamagno, Pierre. *Challenging fission cross section simulation with long standing macro-microscopic model of nucleus potential energy surface*. Diss. Université de Bordeaux, 2015.

[3] Schmitt, C., et al. "Performance of the Fourier shape parametrization for the fission process." *Physical Review C* 95.3 (2017): 034612.

## Effets quantiques dans le modèle de masse FRLDM

DER/SPRC/LEPh



### Formation souhaitée :

Master 2 ou dernière année d'Ecole d'ingénieur en Physique (Nucléaire)

### Durée du stage :

6 mois

### Méthode/logiciel(s):

C++ / Python

### Mots clés :

Simulation, physique théorique

### Possibilité de thèse :

Oui

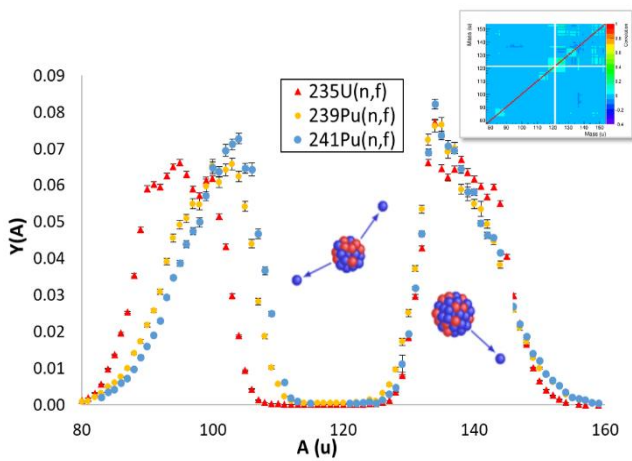
### Contact :

Pastore Alessandro

Alessandro.pastore@cea.fr

# Interprétation d'expériences de combustibles irradiés avec la nouvelle bibliothèque de données nucléaires JEFF-4.0

DER/SPRC/LEPh



La fission nucléaire est un phénomène complexe qui reste un défi à modéliser. Les nombreuses expériences réalisées par le passé nécessitent de nouvelles interprétations pour tester les hypothèses des modèles et comprendre les mécanismes à l'œuvre dans la formation des produits de fission. Les mesures intégrales réalisées en réacteur représentent une ressource importante d'information pour valider les évaluations de rendements de fission. L'objectif de ce stage est de revisiter l'interprétation des expériences de combustibles irradiés au regard des nouvelles bibliothèques de données nucléaires disponibles.

Le LEPh est impliqué dans un programme d'évaluation des rendements de fission induits par neutrons thermiques. Ce travail est réalisé au sein du groupe JEFF (animé par la NEA) et du Coordinated Research Project (CRP) de l'IAEA. Ces dernières années, le développement d'une nouvelle méthodologie d'évaluations des rendements de fission induits par neutrons thermiques a permis de réduire les incertitudes et de déterminer pour la première fois les matrices de corrélations associées aux rendements indépendants et cumulés en partant des données expérimentales. Ce nouveau travail sera intégré au sein de la nouvelle bibliothèque de données nucléaires JEFF-4.0 prévue en 2025.

L'objectif de ce stage est d'utiliser cette nouvelle bibliothèque pour réinterpréter des mesures d'inventaires de combustibles irradiés. Pour cela, le stagiaire s'appuiera sur les schémas de calculs de neutronique en évolution, validés et qualifiés. Dans un premier temps, une analyse de sensibilités du « schéma de calcul » aux paramètres expérimentaux (technologiques, titres en bore, cycles d'irradiations... ) sera réalisée afin d'identifier les possibles incertitudes induites par la méconnaissance de ces paramètres.

De ces informations, une analyse statistique des rapports « calculs sur expériences » (C/E) des concentrations isotopiques doit permettre de déterminer la distribution de probabilités (PDF) de ces rapports, leurs incertitudes systématiques ainsi que leurs corrélations. Pour cela, des outils d'échantillonnage Monte-Carlo des bibliothèques seront notamment mis en œuvre pour estimer la contribution des incertitudes des données nucléaires aux interprétations des mesures de combustibles irradiés (C/E).

Un second objectif sera d'étudier l'impact des nouvelles évaluations des rendements indépendants et cumulés sur la perte de réactivité d'un assemblage MOX en fonction de son taux de combustion (burnup).

## ■ Formation souhaitée :

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

Connaissances en neutronique et physique des réacteurs indispensables

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

C++, Word, Excel, Environnement Linux et Windows

## ■ Mots clés :

Physique des réacteur, statistique, test de modèles

## ■ Possibilité de thèse :

Oui, mais sur un sujet connexe

## ■ Contact :

Tangl.NICOL@cea.fr,

Gregoire.KESSEDJIAN@cea.fr

Tangl.Nicolas, Gregoire Kessedjian





# Simulation Monte-Carlo de campagnes expérimentales de mesure de neutrons retardés de l' $^{238}\text{U}$

DER/SPRC/LEPh

Les neutrons retardés (NR) jouent un rôle crucial dans la cinétique des réacteurs nucléaires. Les incertitudes actuelles sur le rendement des NR nécessitent des mesures plus précises. Dans le cadre de la collaboration ALDEN, plusieurs campagnes expérimentales ont déjà été menées au PTB en Allemagne.

Ce stage a pour ambition de simuler le dispositif expérimental utilisé au PTB à l'aide des codes GEANT4 ou MCNP. L'objectif est de reproduire le spectre énergétique des neutrons et de comprendre les réactions parasites susceptibles d'affecter les mesures. Cette simulation est essentielle pour valider les méthodes expérimentales et améliorer la précision des futures campagnes expérimentales.

## Introduction :

L'objectif de ce stage est de simuler le dispositif expérimental utilisé au PTB dans le cadre de campagnes expérimentales de mesure des neutrons retardés de l' $^{238}\text{U}$ . Lors de ces expériences, un échantillon de  $^{238}\text{U}$  est irradié avec un faisceau de neutron mono-énergétique fourni par la source de neutrons.

Cependant, des réactions parasites, à l'instar de réactions de break-up ou encore d'interaction avec des particules implantées dans le support de la cible, perturbent le spectre neutronique produit. Ces réactions, encore mal comprises, dépendent fortement du dispositif expérimental utilisé et sont difficiles à estimer au premier ordre, ce qui rend impératif leur compréhension plus précise et leur modélisation.

La première partie de ce stage sera dédiée à une recherche bibliographique des travaux existants sur ce sujet ainsi qu'à une cartographie de toutes les réactions parasites à l'œuvre au cours de ces expériences. La seconde partie sera quant à elle dédiée à la simulation de ce dispositif à l'aide des codes de simulation Monte-Carlo GEANT4 ou MCNP. Ce stage pourra ensuite déboucher sur une thèse entièrement consacrée à la mise en place de campagnes expérimentales, à l'analyse, la simulation et la publication des mesures de neutrons retardés de différents isotopes d'intérêt.

## Description du Dispositif Expérimental :

Le dispositif expérimental à simuler comprend les éléments suivants :

- Un accélérateur de particules produisant un faisceau de protons ou de deutons, qui pourra être considéré comme une source.
- Une cible composée de tritium solide ou de deutérium gazeux, où les particules interagissent par fusion-évaporation pour produire un faisceau de neutrons.
- Une feuille d'or placée après la cible gazeuse pour stopper les particules n'ayant pas interagit, qui peut devenir une cible secondaire en accumulant des particules implantées, générant ainsi des neutrons de basse énergie.
- Un échantillon de  $^{238}\text{U}$  placé après la feuille d'or, au cœur du détecteur.
- Le détecteur composé de compteurs

proportionnels He au sein d'une matrice en polyéthylène.

## Objectifs du Stage :

### 1. Etude bibliographique

Identifier et comprendre les réactions parasites susceptibles de se produire dans le dispositif expérimental.

Étudier l'impact de ces réactions sur le flux neutronique et sur les mesures de neutrons retardés.

### 2. Simulation du Dispositif Expérimental :

Utiliser les codes GEANT4 ou MCNP pour modéliser le dispositif expérimental du PTB.

Reproduire le spectre énergétique des neutrons produits en incluant les effets des réactions parasites, comme le break-up et les implantations dans la feuille d'or.

### 3. Validation des Méthodes Expérimentales :

Comparer les résultats de la simulation avec les données expérimentales disponibles.

Valider les méthodes de mesure utilisées lors des expériences menées au PTB.

Proposer des améliorations pour les futures campagnes expérimentales basées sur les résultats de la simulation.

## Conclusion :

Ce stage est essentiel pour améliorer la compréhension des phénomènes affectant les mesures de neutrons retardés et pour valider les méthodes expérimentales.

Ce travail contribuera à l'amélioration continue des résultats de calcul de cinétique des réacteurs nucléaires et participera à la sûreté et à l'efficacité des réacteurs de Génération III & IV.

## ■ Formation souhaitée :

- Master en physique subatomique ou en physique nucléaire
- Ecole d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

- 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

- Simulation GEANT4 / MCNP
- C++, Python

## ■ Mots clés :

- Simulation, neutrons retardés, réactions de break-up, neutronique

## ■ Possibilité de thèse :

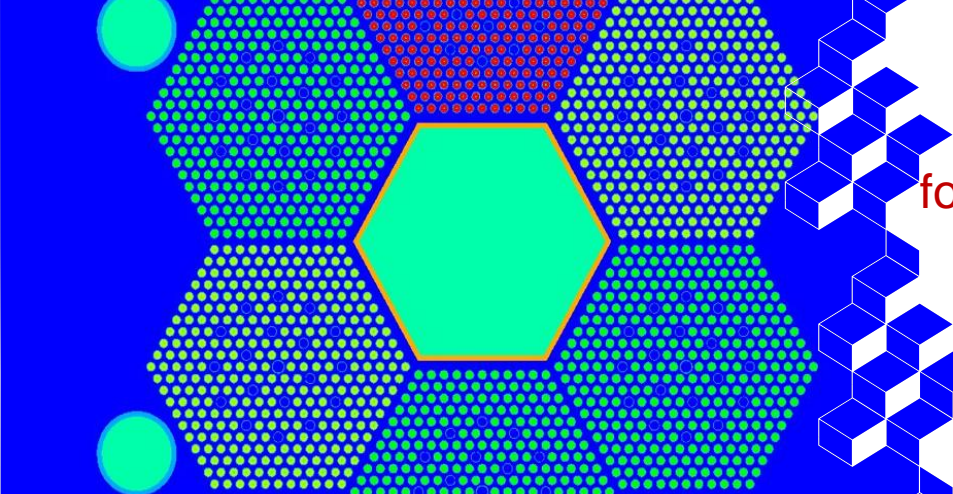
Oui

## ■ Contact :

KESSACI Kieran

Kieran.kessaci@cea.fr





## Validation des fonctionnalités de calcul de perturbation exacte pour l'estimation d'incertitudes technologiques sur des calculs de réacteur

DER/SPRC/LEPh

**Mise en œuvre de la méthode des probabilités itérées de fission (IFP) en Monte-Carlo afin d'estimer la variation de paramètres neutroniques (par exemple la réactivité) consécutive à la variation d'une ou plusieurs données nucléaires microscopiques (par exemple les paramètres de résonance).**

Dans le cadre de ce stage, on explorera les capacités offertes par une maquette Monte-Carlo 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 sur la réactivité du cœur de réacteur.

Le stage se déroulera par étapes de complexité incrémentale :

- Dans un premier temps, l'étudiante/étudiant réalisera la modélisation en géométrie ROOT de différents benchmarks analytiques pour lesquels seront éprouvées les fonctionnalités de calcul de perturbation de la maquette Monte-Carlo LAST, en comparaison de calculs réalisés avec le code TRIPOLI-4®. Seront analysés les écarts entre codes, les performances en termes de temps de calcul, le profil de convergence.
- Dans un second temps, l'étudiante/étudiant 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.

- Enfin, l'étudiante/étudiant 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 comparant les fonctionnalités de LAST par rapport à des résultats précédemment acquis avec les codes TRIPOLI4® et MCNP6.

Cette proposition de stage s'inscrit dans le cadre d'un programme d'étude portant sur la mesure de sections efficaces 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 ce cadre, 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.

### ■ 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 :

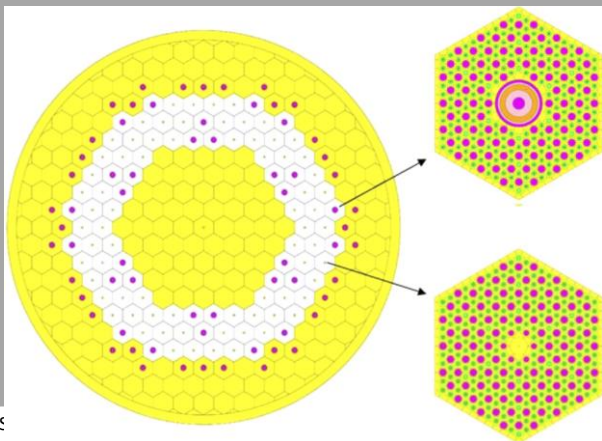
Simulation, neutronique, validation numérique

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

Combe-Colas Rodolphe  
Rodolphe.combe@cea.fr



ANS

## Validation des outils de calcul neutroniques pour les réacteurs à haute température (HTR)

DER/SPRC/LEPh

La conception et l'exploitation de réacteurs nucléaires requièrent la réalisation d'études utilisées pour la démonstration de sûreté nucléaire. Dans le domaine de la physique des réacteurs, ces études reposent sur des Outils de Calcul Scientifique (OCS) qualifiés. Ces OCS multifilières doivent être validés pour une gamme étendue de concepts incluant les réacteurs à haute température (HTR)

Le développement et la conception de réacteurs de nouvelle génération (quatrième ou autre) nécessite de disposer d'outils de simulation (OCS) validés sur une large gamme du domaine d'application. Pour ces OCS, outre la phase de vérification informatique des fonctionnalités de base des codes, la phase de validation se fait essentiellement via la comparaison à un corpus d'expériences.

Avec l'émergence de nouveaux concepts très divers (MSR, micro-réacteurs, SMR, HTR, LFR, etc...), le recours aux outils de simulation numériques va grandissant, tant pour des besoins de conception (estimation des performances du cœur) que pour l'établissement de dossier de sûreté (caractérisation du comportement en régimes nominal et accidentel).

Dans le cas des réacteurs à haute température (HTR), les concepts courants se basent sur des cœurs de puissance réduites (type SMR) qui présentent certains challenges en terme de caractérisation locale de certaines quantités d'intérêt pour la neutronique et les autres disciplines en interface pour des calculs couplés (nappe de puissance, poids de absorbants, contre-réactions,...).

Les OCS de neutronique de nouvelle génération (APOLLO3®) permettent notamment une plus grande flexibilité en terme de description géométrique des calculs de cœurs ce qui les rend particulièrement intéressants pour une caractérisation fine des quantités d'intérêt cibles.

Pour la phase de validation de ces OCS, il est nécessaire de quantifier les biais de calcul résiduels via une comparaison exhaustive, à des résultats provenant de calculs de référence (Monte-Carlo) et cela pour chaque étape du schéma de calcul.

**L'objectif du stage est de quantifier les biais de deux types de schémas de calculs : un schéma de référence (couteux mais précis) et un schéma « projet » (plus rapide mais avec une précision réduite) pour plusieurs designs de cœurs HTR prismatiques à définir (étude en fonction de la taille du réacteur).**

**Une propagation des incertitudes dues aux données nucléaires sera aussi effectuée en se basant sur les méthodes de perturbations disponibles dans le code déterministe APOLLO3®.**

Ce stage permettra à l'étudiant de prendre en main les techniques utilisées en physique des réacteurs, d'appréhender la mise en place d'OCS en neutronique, ainsi que la problématique de quantification des biais et incertitudes.

Les méthodes abordées ont une importance majeure dans le cadre des démarches de validation et de quantification des incertitudes des OCS. Ce sujet présente donc un intérêt pour les travaux de recherche et développement du CEA et de ses partenaires industriels.

### ■ 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, validation expérimentale

### ■ Possibilité de thèse :

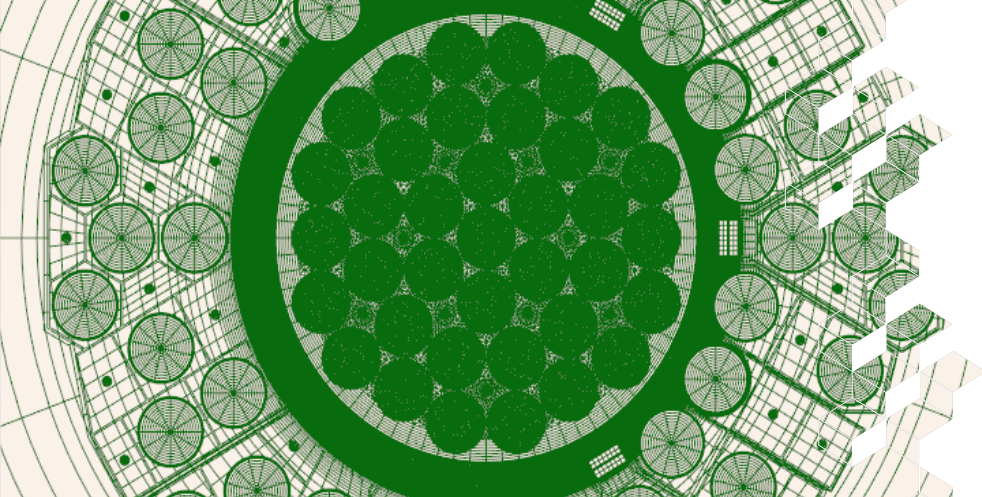
Non

### ■ Contact :

BUIRON Laurent

Laurent.buiron@cea.fr





## Simulation du Réacteur Jules Horowitz (RJH) à l'aide de l'outil INCA

DER/SPRC/LE2C

Le RJH possède une géométrie complexe, actuellement modélisée dans différents formulaires et codes de neutronique du CEA. Le SPRC développe un outil, INCA, pour mutualiser la production des géométries et l'exécution des codes de neutronique dans une seule interface.

L'objectif de ce stage est de réaliser la description du RJH dans INCA, afin d'améliorer les capacités du SPRC de modélisation d'un système aussi complexe, et d'unifier les descriptions du cœur dans les différents formulaires de neutronique du CEA.

Le Réacteur Jules Horowitz (RJH) permettra d'irradier différents dispositifs expérimentaux, qui seront insérés dans son réflecteur et/ou son cœur. Pour mener à bien les différentes expériences, il est nécessaire d'avoir une connaissance fine des paramètres neutroniques (flux, taux de réaction ...) du réacteur. Celui-ci est modélisé au SPRC avec plusieurs formulaires de neutronique. En particulier, les outils GADGET et GATO permettent de produire les descriptions géométriques détaillées pour, respectivement, les codes TRIPOLI-4 et APOLLO3. Appliquer un changement sur la géométrie du réacteur nécessite ainsi d'éditer toutes les géométries disponibles, dans différents formats.

Le Service de Physique des Réacteurs et du Cœur (SPRC) développe un outil appelé Interface Neutronique de Conception Avancée (INCA), capable de produire automatiquement des géométries pour plusieurs formulaires de calcul à partir d'une seule description fine du cœur, ainsi que de gérer l'exécution des codes de neutronique associés.

L'objectif du stage est de réaliser la description du RJH avec INCA, afin d'en simplifier la modélisation et d'augmenter l'efficacité de mise en place des calculs futurs. Le stagiaire devra, à partir des descriptions GADGET et GATO, produire une modélisation fine du cœur du RJH et de son réflecteur; il devra ensuite vérifier que les simulations réalisées avec INCA recollent au dossier de validation numérique du formulaire HORUS.

### ■ 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  
INCA, HORUS3D/E, TRIPOLI-4, ALAMOS, ROOT

### ■ Mots clés :

neutronique, RJH, INCA

### ■ Possibilité de thèse :

non

GUADAGNI Ettore

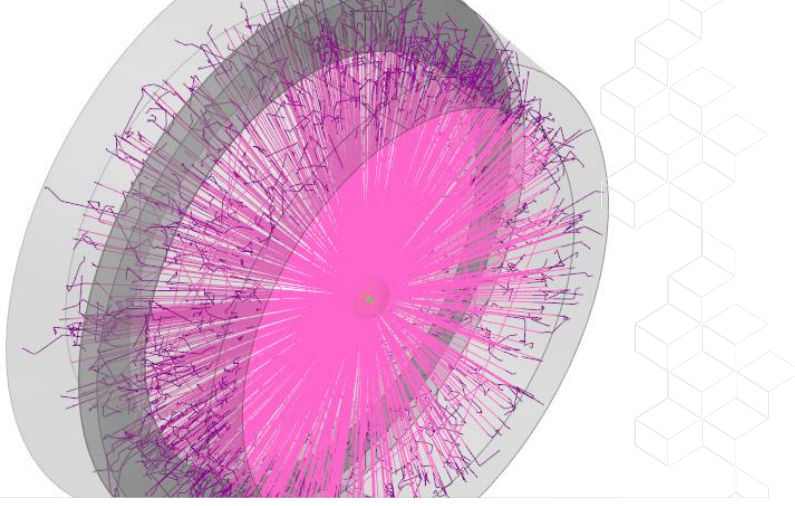
ettore.guadagni@cea.fr

### ■ Contact :

VANDERMEERSCH Elias

elias.vandermeersch@cea.fr





## Performances de l'estimateur eTLE pour des applications de type imagerie

DER/SPRC/LPN

**Le sujet de stage se positionne dans le cadre du Projet Transversal de Compétences Hy-MONCA dont l'objectif est de mutualiser des développements réalisés au sein de deux directions du CEA, la DRT et la DES.**

L'équipe de la DRT impliquée dans ce projet est spécialisée dans le contrôle non-destructif et le développement du logiciel CIVA. Le module RT (pour Radiography Testing) de ce dernier permet de modéliser la géométrie et les caractéristiques d'une pièce, d'y implanter un défaut type et d'analyser les images radiographiques obtenues. L'algorithme embarqué se doit donc d'être performant en termes de précision et de rapidité d'exécution.

En parallèle, l'équipe de la DES engagée ici, soit le SPRC/LPN, s'est penchée ces dernières années sur le développement d'un estimateur de type next-event (nommé eTLE pour expectation Track Length Estimator) dans le code Monte Carlo du CEA, TRIPOLI-4®, afin d'optimiser l'efficacité de ce dernier pour l'obtention de scores maillés. Cet estimateur permet l'accélération du calcul Monte Carlo en générant un grand nombre de pseudo-particules à chaque interaction des particules primaires. Ces pseudo-particules sont transportées en ligne droite vers le détecteur. En outre, il peut présenter un intérêt non négligeable pour la génération d'images dans la mesure où il est couplé avec un algorithme de détection forcée.

*l'estimateur eTLE couplé à un algorithme de détection forcée pour des applications dans le domaine du contrôle non destructif. L'algorithme dans sa version détection forcée est déjà implémenté dans TRIPOLI-4®. Les configurations d'intérêt seront fournies par la DRT/LIST afin d'établir les modélisations correspondantes et de réaliser les calculs à l'aide de TRIPOLI-4®. Des comparaisons seront effectuées entre les différents estimateurs disponibles dans TRIPOLI-4®, mais également avec d'autres codes Monte Carlo (PENELOPE par exemple) et avec CIVA. Des analyses plus poussées permettront d'envisager la possibilité de porter en partie cet estimateur sur GPU.*

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 – École d'ingénieurs

### ■ Durée du stage :

6 à 8 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

TRIPOLI-4®, CIVA, python/C++, GPU

### ■ Mots clés :

Monte Carlo, contrôle non-destructif

### ■ Possibilité de thèse :

oui

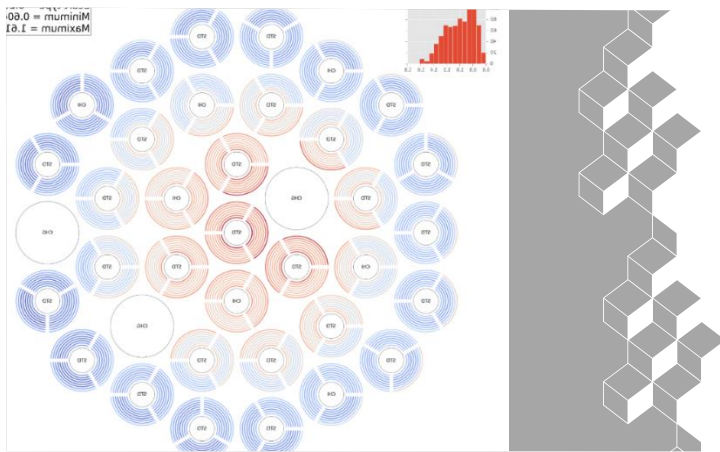
### ■ Contact :

LE LOIREC Cindy

Cindy.LELOIREC@cea.fr

*L'objectif de ce stage est donc d'analyser les performances de*





# Validation d'une méthode avancée de reconstruction de la puissance fine pour le jumeau numérique du RJH

DER/SPRC/LPN

**Afin de perfectionner le jumeau numérique du réacteur RJH, il est proposé d'évaluer les performances d'une méthode innovante de reconstruction fine de la puissance. La précision ainsi gagnée sera évaluée par comparaison à des outils de calcul de référence. Ce stage s'inscrit dans la démarche d'optimisation des moyens de simulation qui accompagne la conception puis l'exploitation du réacteur expérimental RJH.**

La conception d'un cœur de réacteur nucléaire nécessite l'évaluation de grandeurs neutroniques d'intérêt comme la réactivité ou les distributions de puissance. Afin de calculer ces grandeurs dans des temps raisonnables, tant pour la conception que l'exploitation, des schémas de calcul sont mis au point. Ceux-ci utilisent des méthodes déterministes pour résoudre l'équation du transport sur un assemblage seul (calcul réseau), ou bien pour résoudre l'équation de la diffusion sur un cœur entier. Il s'agit d'intégrer une équation différentielle avec des méthodes du type éléments finis. Afin d'obtenir les résultats nécessaires dans des temps raisonnables, la taille des éléments finis doit être suffisamment grande. Celle-ci dépasse alors la taille du plus petit détail de la géométrie, le crayon pour un REP, ou bien la plaque pour d'autres réacteurs comme le RJH. Seule une puissance moyennée sur une maille bien plus grande est connue lorsqu'on souhaite retrouver la puissance libérée dans un crayon. On recourt alors à une reconstruction de la puissance fine pour retrouver ce niveau de détail.

Le Laboratoire de Projets Nucléaires (LPN), au sein de la Direction des ÉnergieS du CEA, est en charge du développement et de la validation des outils de calcul scientifique neutroniques dédiés aux réacteurs expérimentaux et embarqués. Il est notamment en charge du développement et de la validation du schéma de calcul neutronique de conception et d'exploitation pour le réacteur RJH, actuellement en construction sur le site du CEA de Cadarache. Afin de mener des expériences nécessitant de fortes fluences rapides, des dispositifs expérimentaux sont insérées au sein même de son cœur, ce qui crée

d'importantes hétérogénéités. En conséquence, ce cœur a une composition variable et hétérogène, le nombre d'éléments combustibles comme la nature et l'emplacement des expériences pouvant changer d'une campagne à l'autre.

Le stage s'inscrit dans une optique d'amélioration de ce jumeau numérique ou schéma de calcul, et plus particulièrement sa reconstruction de puissance fine. Les méthodes courantes s'appuient sur une factorisation du flux par une structure fine qui est calculée en réseau infini. Cependant, dans un cœur aussi hétérogène que celui du RJH, cette approximation peut montrer ses limites. Une méthode alternative basée sur un couplage réseau/cœur a été conçue et nécessite d'être validée.

Le travail demandé pour ce stage consiste à valider la reconstruction de puissance proposée. L'étudiant prendra en main le schéma de calcul construit sur la base des codes déterministes APOLLO2 et CRONOS2, calculera des distributions de puissance avec les deux méthodes de reconstruction de la puissance fine, et se comparera à des calculs de référence. Les configurations du cœur qui seront utilisées appartiennent à la base de validation existante. Ainsi, les résultats des calculs de référence menés avec le code Monte-Carlo TRIPOLI4® sont déjà disponibles. Les écarts sur les distributions de puissance seront ensuite analysés pour quantifier les biais et incertitudes associés, et mener une analyse de sensibilité.

## ■ Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> 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, GIBIANE

## ■ Mots clés :

Reconstruction de puissance fine, jumeau numérique, schéma de calcul

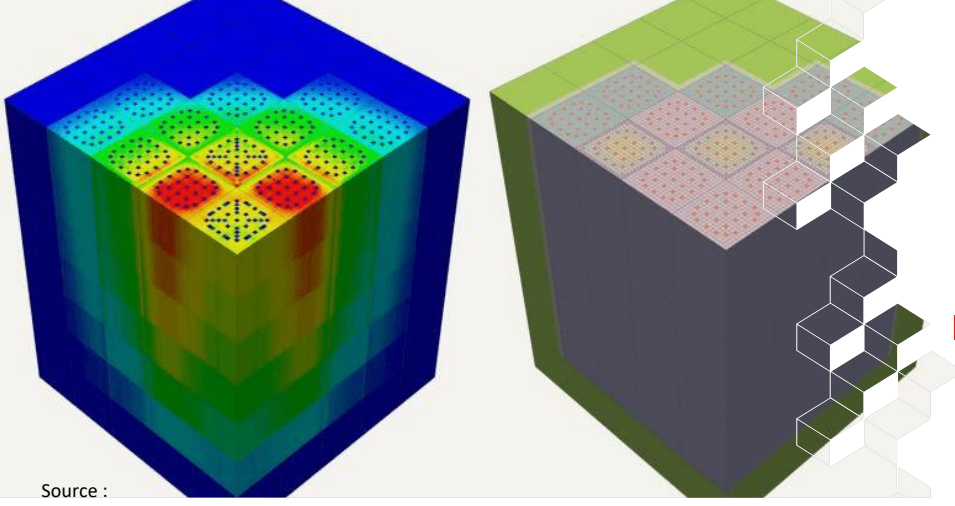
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

Victor du Buat

Victor.dubuat@cea.fr



Source :  
ANSWERS®

## Propagation des incertitudes dues aux données nucléaires d'un SMR en utilisant des méthodes innovantes de type bases réduites

DER/SPRC/LPN

**La conception et l'exploitation de réacteurs nucléaires requièrent la réalisation d'études utilisées pour la démonstration de sûreté nucléaire. Dans le domaine de la physique des réacteurs, ces études reposent sur des Outils de Calcul Scientifique (OCS) qualifiés.**

Un des objectifs de la qualification est l'obtention d'une loi de biais et incertitudes pour chacune des grandeurs d'intérêts. Elle quantifie l'erreur commise lors d'un calcul et traduit donc la confiance que nous pouvons avoir dans notre OCS.

Une des méthodes disponibles pour calculer cette loi est la propagation des incertitudes à priori. Elle utilise des calculs de perturbation qui permettent d'évaluer les effets de petites variations des données d'entrée sur le résultat de l'OCS. Etant donné le nombre important de paramètres d'entrées, l'inconvénient majeur de cette méthode est le volume de calcul nécessaire.

Afin de diminuer les temps de calcul liés à ces études, la Théorie des Perturbations Généralisée peut être utilisée. Elle est cependant limitée aux perturbations pour une unique grandeur d'intérêt. Or, nous sommes intéressés par le flux neutronique et de la nappe de puissance en tout point du réacteur.

**C'est pourquoi des méthodes innovantes utilisant conjointement la Théorie des Perturbations et des méthodes de type bases réduites ont récemment été mises en place dans le cadre d'une thèse. Elles permettent de reconstruire le flux neutronique perturbé dans sa globalité.**

**réaliser la propagation des incertitudes dues aux données nucléaires pour un réacteur de type SMR en utilisant ces méthodes innovantes et le code de nouvelle génération APOLLO3®. Ces résultats pourront être confrontés à ceux obtenus par perturbation directe afin de valider les méthodes.**

Ce stage permettra à l'étudiant de prendre en main les techniques utilisées en physique des réacteurs, d'appréhender la mise en place d'OCS en neutronique, ainsi que la problématique de quantification des incertitudes.

Les méthodes abordées ont une importance majeure dans le cadre des démarches de validation et quantification des incertitudes des OCS. Ce sujet présente donc un intérêt pour les travaux de recherche et développement du CEA et de ses partenaires industriels.

Le stage se déroulera au Laboratoire des Projets Nucléaires (LPN), au sein de la Direction des Energies (DES). Le LPN est en charge du développement des Outils de Calculs Scientifique de neutronique utilisés pour la conception d'un nouveau réacteur de type SMR.

### ■ 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, perturbations

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

SAUZEDDE Thibault  
thibault.sauzedde@cea.fr

L'objectif du stage est de





# Propagation d'incertitudes de type technologique sur la puissance résiduelle

DER/SPRC/LPN

**Le sujet de stage se positionne dans le contexte de l'évaluation de l'incertitude associée à l'estimation de la puissance résiduelle. Cette dernière revêt un aspect essentiel dans l'objectif d'accéder à une prédiction la plus fiable et contrôlée possible pour justifier les décisions prises concernant le combustible irradié.**

L'évaluation de l'incertitude associée à l'estimation de la puissance résiduelle est un aspect essentiel dans l'objectif d'accéder à une prédiction la plus fiable et contrôlée possible pour justifier les décisions prises concernant le combustible irradié.

Non seulement peu de mesures sur cette puissance résiduelle sont aujourd'hui disponibles mais, en outre, les valeurs expérimentales disponibles ne permettent pas de couvrir l'étendue des possibilités de combinaisons entre paramètres. L'estimation de la puissance résiduelle est donc principalement basée sur des codes de calcul. Le schéma actuellement mis en place au sein du Service de Physique des Réacteurs et du Cycle est basé sur un calcul réalisé en deux étapes : une étape réseau avec un code de transport permettant de générer des sections et des flux multigroupes pour le milieu désiré en fonction du taux de combustion et une étape d'évolution avec un historique d'irradiation détaillé et des chaînes d'évolution à ~3 000 isotopes..

Des études ont d'ores et déjà été menées sur l'estimation de l'incertitude de la puissance résiduelle induite par les incertitudes sur les données nucléaires. Deux méthodes ont été explorées: la première est une méthode de calcul des sensibilités par perturbation directe; la seconde est une méthode probabiliste basée sur l'échantillonnage des incertitudes selon une distribution donnée et sur la réalisation de plusieurs calculs pour évaluer la distribution de la grandeur d'intérêt, sa valeur centrée et son écart-type. Des milliers de simulations sont alors nécessaires pour assurer une convergence correcte des résultats. Ce cadre mathématique est très bien adapté lorsqu'on connaît les matrices de covariance entre les paramètres incertains et que ces paramètres

peuvent être représentés par des scalaires, ou une liste de scalaires.

Des travaux très récents ont cherché à propager des incertitudes d'ordre technologique telles que les paramètres de modélisation des assemblages, voire opérationnelle telles que les conditions d'opération (historique d'irradiation entre autre). Plusieurs méthodes peuvent s'avérer intéressantes: les processus gaussiens, l'approche bayésienne, les polynômes du chaos.

*L'objectif de ce stage est de prendre en main l'une (voire plusieurs) de ces méthodes et de la mettre en œuvre pour propager les incertitudes des paramètres d'entrée technologiques sur la puissance résiduelle. L'étudiant bénéficiera pour cela d'une base de données construite sur la base du schéma de calcul utilisé actuellement au CEA et sur des plages de variation des paramètres d'entrée fournies par les industriels. En outre, quelle que soit la méthode de propagation des incertitudes envisagée, une réduction du modèle devra être réalisée pour la construction du modèle de substitution. Une méthode d'analyse de sensibilité sera également menée afin de déterminer les données technologiques les plus impactantes sur la puissance résiduelle.*

*L'analyse de ces résultats et des méthodes employées permettra d'envisager la possibilité de mettre en œuvre les méthodes choisies pour des données d'entrée de type fonctionnel (historiques de fonctionnement par exemple).*

## ■ Formation souhaitée :

Master 2 – École d'ingénieurs  
Mathématicien avec une appétence pour la physique – ou - neutronicien avec une forte appétence pour les mathématiques

## ■ Durée du stage :

6 à 8 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Linux – bonne connaissance des logiciels de programmation de type Python, R, C++

## ■ Mots clés :

probabilités/stat, machine learning

## ■ Possibilité de thèse :

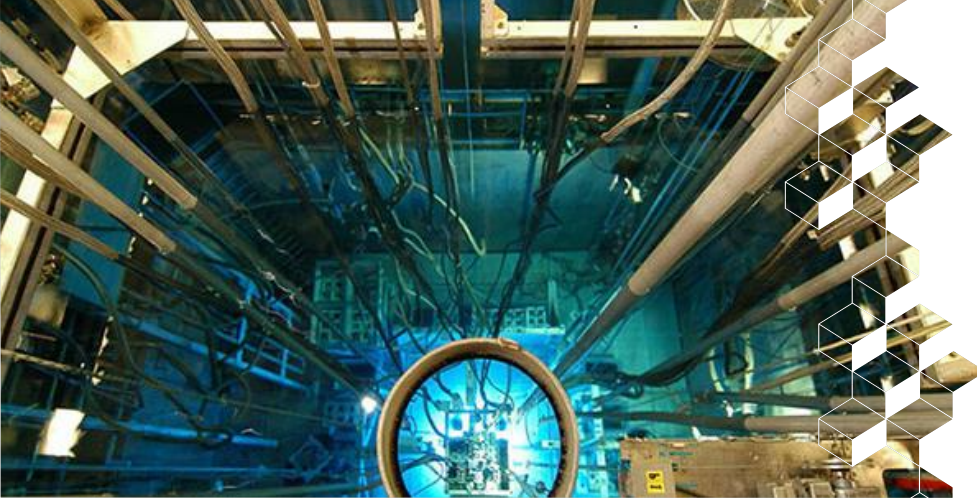
oui

## ■ Contact :

LE LOIREC Cindy

Cindy.LELOIREC@cea.fr





# Modélisation des échauffements nucléaires dans le réacteur LVR-15

DER/SPRC/LPN

**Dans le cadre du projet FIDES de l'OCDE/AEN, un benchmark a été proposé pour améliorer la modélisation des échauffements nucléaires en réacteur dans les codes de calcul neutronique. Les résultats de ce stage seront à comparer à ceux des autres organismes participant au projet.**

La problématique des échauffements nucléaires en cœur est cruciale pour la conception des réacteurs et des dispositifs expérimentaux. La bonne maîtrise de ce phénomène permet de déterminer les températures atteintes dans les matériaux lors des phases de fonctionnement du réacteur et est donc indispensable pour garantir la sûreté des réacteurs.

Le terme « échauffement nucléaire » désigne l'énergie déposée dans le réacteur par diverses particules telles que les neutrons, les électrons, les particules chargées lourdes, les photons. Dans un réacteur de puissance, ces particules sont principalement générées par trois types de réactions : la fission, la capture neutronique et la diffusion inélastique. En simulation neutronique, l'évaluation des sources de particules, qu'elles soient émises de manière prompte ou retardée, nécessite la mise en œuvre d'un schéma de calcul spécifique, combinant des codes de transport et des codes d'évaluation des sources radioactives.

Le LVR-15 est un réacteur d'irradiation tchèque utilisé pour de nombreuses applications, notamment la production de radio-isotopes pour la médecine ou l'étude du comportement des matériaux sous irradiation. L'objectif de ce stage est d'évaluer les

échauffements nucléaires de ce cœur en suivant les spécifications du benchmark émises par l'exploitant du réacteur.

Les missions qui vous seront confiées sont les suivantes :

- Modéliser le cœur du réacteur LVR-15 en conditions critiques dans le code de transport Monte-Carlo TRIPOLI-4, en utilisant les caractéristiques fournies dans le benchmark ;
- Déterminer les contributions prompte et retardée à l'échauffement nucléaire ;
- Evaluer les spectres de flux neutronique, l'énergie déposée et les DPA (déplacements par atome) dans différents éléments de structures du réacteur ;
- Comparer les résultats obtenus avec ceux des autres membres de la communauté FIDES.

Vous réaliserez ce stage au sein du Laboratoire de Projets Nucléaires qui est en charge du développement et de la validation des outils de calcul scientifique neutroniques dédiés aux réacteurs expérimentaux et embarqués.

## ■ Formation souhaitée :

Neutronique, physique des réacteurs

## ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

Unix/Linux, Python, code de transport Monte-Carlo (TRIPOLI-4)

## ■ Mots clés :

Neutronique, physique des réacteurs, échauffements nucléaires

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

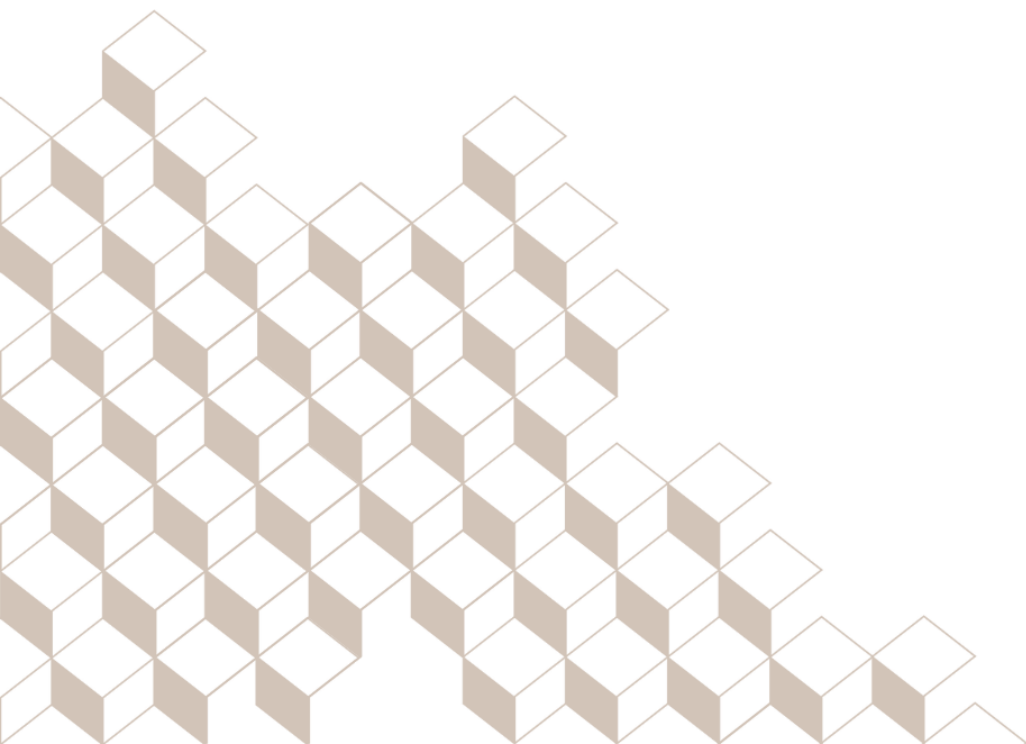
BEN-YELLES Anis  
anis.benyelles@cea.fr



S E R J H

Service exploitation  
réacteur Jules  
Horowitz

*Jules Horowitz Reactor Operations Unit*





## Equipe cellules chaudes : Etude de faisabilité pour l'implantation d'une cellule maquette sur TOTEM

DER/SERJH/LEHC

**L'objectif est d'étudier la faisabilité d'implantation d'une cellule maquette dans le hall TOTEM.**

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

Ce réacteur expérimental de type piscine permettra d'accueillir de nombreux dispositifs expérimentaux dans le cœur du réacteur ou en périphérie, en réflecteur.

Une fois irradiés, ces dispositifs expérimentaux sont acheminés vers des cellules blindées de haute activité. Ces dernières, également appelées « cellules chaudes » permettent de réaliser un certain nombre d'opérations grâce à des bras robotisés (télé-opération) tout en garantissant la sûreté et la sécurité des opérateurs.

La réalisation de cellules maquettes permet de :

- Valider certains aménagements internes des cellules ;
- Valider la conception des équipements de cellules ;
- Valider la télé-opérabilité des dispositifs expérimentaux ;
- Former les futurs opérateurs du RJH.

Le futur exploitant (SERJH) exprime donc au travers d'un document spécifique son besoin d'avoir une

maquette représentative d'une grande cellule du RJH. Pour réaliser des essais en usine, le Titulaire du marché des équipements de cellule a réalisé une cellule maquette.

L'objet du stage est donc d'analyser la faisabilité de l'implantation de cette maquette dans le hall TOTEM et le cas échéant, faire état des modifications à apporter.

### ■ Formation souhaitée :

BUT / BTS / Bac professionnel avec une spécialité mécanique / productique

### ■ Durée du stage :

3 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Conception mécanique,  
SolidWorks

### ■ Mots clés :

Mécanique, Conception,  
Dimensionnement

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

VADON Manon  
manon.vadon@cea.fr





## Fonctionnement RJH : Données d'entrée

DER/SERJH/LEMC

**L'objectif est d'extraire les informations techniques de différentes bases de données ou fichiers pour alimenter ou corriger les données de façon automatique.**

Le Réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) est un réacteur d'essais matériaux, en cours de construction sur le site de Cadarache. D'une puissance maximale de 100 MWth, le RJH est dédié à la recherche nucléaire en réalisant des études sur le vieillissement des matériaux et des combustibles mais il est également dédié à la production de radioéléments.

Le service d'exploitation du RJH (SERJH) a développé un outil permettant d'analyser l'impact de la maintenance des équipements sur la disponibilité du RJH.

L'outil est constitué d'un fichier Excel contenant certaines informations qui permettent de repérer les équipements de différents circuits et/ou systèmes de l'installation du RJH et de les localiser.

Ces informations sont issues de différents supports tels que bases de données, fichier Excel, documents numériques.

Actuellement, les informations qui alimentent l'outil, sont entrées à la main et l'objectif de ce stage est de développer une méthode automatique de saisie de ces informations et éventuellement de tri.

Dans un premier temps, il conviendra d'identifier les informations nécessaires à l'alimentation de l'outil et d'en déterminer leur(s) source(s).

Une fois les données identifiées, la tâche suivante consistera à mettre en œuvre une méthode fiable et facile d'importation de ces informations dans l'outil développé.

Lors de cette phase, il sera judicieux de s'interroger sur l'utilité ou non de transformer l'outil Excel en un outil Access.

Si effectivement l'analyse conduit à privilégier un développement de l'outil sous Access, la troisième partie de ce stage, consistera à définir la structure et l'architecture du nouvel outil et à mettre en place les différents liens permettant de répondre aux besoins de l'analyse.

Le profil du candidat est principalement informaticien, ayant une bonne connaissance des outils standards Microsoft : Excel et Access.

Le stagiaire devra également présenter des aptitudes en relations humaines à travers les échanges avec le futur exploitant et être force de propositions.

### ■ Formation souhaitée :

École d'informatique et de traitement de données

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Excel / VBA / Access

### ■ Mots clés :

Base de données, traitement de l'information, tableur

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

M. BERTHET  
[matthieu.berthet@cea.fr](mailto:matthieu.berthet@cea.fr)





## Fonctionnement RJH : Architecture opérationnelle et impact de la maintenance

DER/SERJH/LEMC

**L'objectif est d'optimiser la planification de la maintenance en étudiant l'impact de la maintenance des différents systèmes du RJH sur la disponibilité de l'installation.**

Le Réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) est un réacteur d'essais matériaux, en cours de construction sur le site de Cadarache. D'une puissance maximale de 100 MWth, le RJH est dédié à la recherche nucléaire en réalisant des études sur le vieillissement des matériaux et des combustibles mais il est également dédié à la production de radioéléments.

La garantie du bon fonctionnement d'une installation nucléaire repose en grande partie sur son architecture fonctionnelle et sa capacité à assurer les trois principales fonctions de sûreté que sont le contrôle de la sous-criticité, l'évacuation de la puissance et le confinement des matières radioactives.

Une indisponibilité d'un système de cette architecture fonctionnelle peut conduire à une dégradation plus ou moins importante des moyens d'exploitation et ne plus garantir une gestion optimale des fonctions de sûreté de l'installation.

L'objectif de ce sujet d'apprentissage est de développer un outil présentant à l'exploitant une vision globale de l'architecture fonctionnelle et de l'état opérationnel de l'installation RJH.

Pour cela, le candidat pourra s'appuyer sur des travaux précédemment réalisés dans le service tels que la conception d'un outil contenant l'ensemble des systèmes/circuits de l'installation RJH et les fonctions opérationnelles qu'il remplissent. Ainsi qu'un outil illustrant les liens entre les systèmes/circuits et les principales fonctions de sûreté, pour un état donné de l'installation.

Cet outil devra être capable de présenter aux équipes de conduite les stratégies mises en place pour la maintenance, la conduite normale, incidentelle et accidentelle et les dispositions prises pour les gérer en lien avec les états du réacteur (repli de puissance, changement d'état, repli vers un état sûr...).

Ce travail requiert des connaissances dans le fonctionnement, la sûreté, la conduite et l'exploitation de réacteurs nucléaires expérimentaux.

Le candidat devra également présenter des aptitudes en relations humaines à travers les échanges avec le futur exploitant et être force de propositions.

### ■ Formation souhaitée :

Master en apprentissage :  
sûreté, génie des procédés,  
génie industriel, ingénieur  
généraliste

### ■ Durée du stage :

2 ans

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Excel / VBA / Access

### ■ Mots clés :

Réacteur, fonctionnement,  
systèmes, fonctions,  
maintenance, disponibilité

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

C. PADUANO et V. NEGRIER  
[clara.paduano@cea.fr](mailto:clara.paduano@cea.fr) et  
[vincent.negrier@cea.fr](mailto:vincent.negrier@cea.fr)





# Modélisation neutronique d'un essai de chute de barre dans le RJH

DER/SERJH/LFSC

**Ce stage a pour objectif de modéliser l'évolution de la population de neutrons suite à un essai de chute de barre dans le RJH.**

Le CEA est un organisme de recherche public engagé dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le centre de Cadarache, plus gros centre de recherche européen sur les énergies bas carbone, est le site de construction d'un nouveau réacteur nucléaire expérimental, le réacteur Jules Horowitz (RJH). Ce réacteur d'irradiation technologique sera un outil de recherche aux performances exceptionnelles, qui aidera à valider les choix faits pour les futurs réacteurs de puissance.

Un programme expérimental d'essais physiques est prévu au démarrage du RJH, pour vérifier les performances et la sûreté du réacteur. Ces essais représentent une opportunité unique, dans toute la vie de l'installation, de mesurer les caractéristiques physiques neutroniques du premier cœur, dans les conditions expérimentales les plus favorables.

Certains de ces essais s'intéressent au poids en réactivité des absorbants, essentiels pour la sûreté. Une technique expérimentale classique pour peser un absorbant consiste à le faire chuter dans le cœur depuis un état critique et à mesurer la cinétique de décroissance de la population neutronique.

L'inversion des équations de la cinétique permet ainsi de déterminer le poids en réactivité de l'absorbant chuté à partir des taux de comptage mesurés par les différents détecteurs situés à l'intérieur ou à l'extérieur du cœur.

Le transitoire de chute de barre sera décrit par une succession d'états quasi-statiques pour lesquels il s'agira de caractériser la distribution spatiale des sources de neutrons prompts et retardés.

L'étude s'intéressera notamment à l'impact du positionnement des détecteurs sur les résultats obtenus.

Le stagiaire sera accompagné tout au long du stage, sur le plan théorique, comme sur la prise en main des logiciels informatiques du CEA (TRIPOLI4, DARWIN).

## ■ Formation souhaitée :

Bac+5 - Diplôme École d'ingénieurs

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

TRIPOLI-4, DARWIN

## ■ Mots clés :

Neutronique; chute de barre; RJH

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

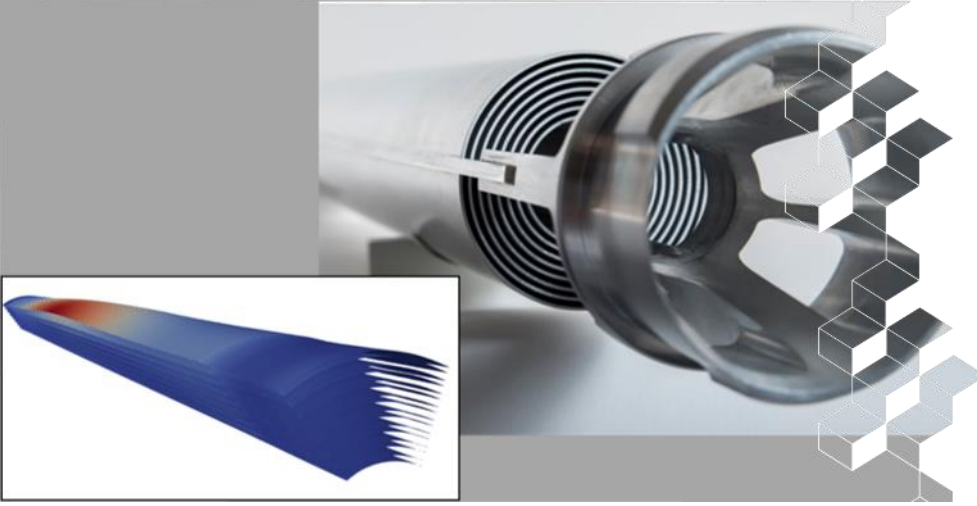
Allan GELLENONCOURT  
[allan.gellenoncourt@cea.fr](mailto:allan.gellenoncourt@cea.fr)



# Modélisation multi-physique du comportement sous irradiation des éléments combustibles du RJH

DER/SERJH/LFSC

DEC/SESC/LEVA



**L'objectif de ce stage est de modéliser l'évolution du comportement sous irradiation d'un élément combustible du RJH en fonction des caractéristiques du cœur, de la charge expérimentale et des positions des barres de contrôle.**

Le 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 combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires actuels et futurs et de produire des radioéléments à usage médical et industriel.

En tant que réacteur de recherche, le RJH utilisera un combustible très particulier, spécialement conçu pour lui. Il ne bénéficie donc pas du même retour d'expérience que celui des centrales électriques. Ce stage vise à obtenir plus de détails sur la manière dont ce combustible va vieillir au cours de son utilisation dans le RJH.

La première partie s'intéressera à la modélisation neutronique de l'évolution sous irradiation des caractéristiques de l'élément combustible (évolution isotopique, distribution de puissance, flux de neutrons).

La deuxième partie exploitera directement les données produites dans la première partie pour modéliser le comportement thermomécanique de l'élément combustible du RJH en fonction de son historique d'irradiation. L'étude s'intéressera en particulier à l'impact des lois de fluage sur les conditions de déformation et de contrainte mécanique de l'élément combustible en cours d'irradiation.

Le stage se déroulera dans deux unités distinctes de l'institut IRESNE du CEA Cadarache. La première partie neutronique se fera au Département d'Etude des Réacteurs, dans le Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz (SERJH) ; la deuxième partie thermomécanique se fera au Département d'Etude du Combustible, dans le Service d'Etude et de Simulation du comportement des Combustibles (SESC). Le stagiaire bénéficiera ainsi de la proximité immédiate de spécialistes de la modélisation des réacteurs expérimentaux dans les deux unités.

Les simulations neutroniques seront réalisées à partir de la plateforme logicielle nommée « HORUS », dédiée aux études de conception, d'exploitation et de sûreté du RJH.

Les simulations thermomécaniques (3D) seront réalisées avec le code aux éléments finis MAIA de la plateforme logicielle PLEIADES, dédiée à la modélisation du comportement thermomécanique des éléments combustibles des réacteurs expérimentaux.

## ■ Formation souhaitée :

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

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

HORUS, PLEIADES/MAIA

## ■ Mots clés :

Simulation, Neutronique, Thermomécanique

## ■ Possibilité de thèse :

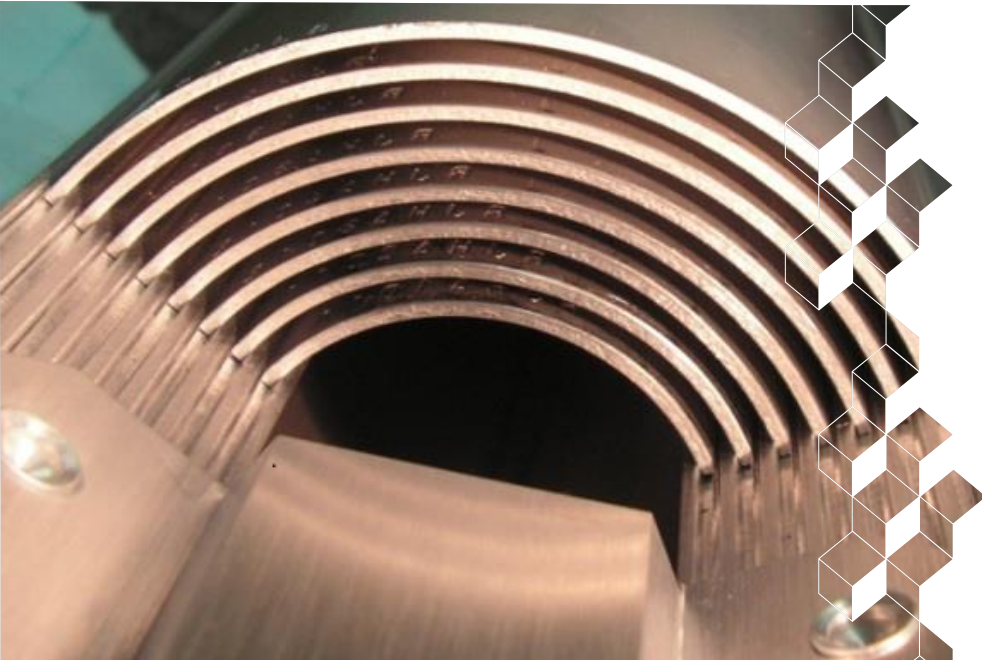
Non

## ■ Contact :

LORENZO Denis  
BLANCHET David

[denis.lorenzo@cea.fr](mailto:denis.lorenzo@cea.fr)  
[david.blanchet@cea.fr](mailto:david.blanchet@cea.fr)





## Conception neutronique d'un dispositif innovant pour la validation de combustibles à plaques

DER / SERJH / LFSC

**Dans l'intention d'exploiter les emplacements disponibles du cœur RJH, l'objectif est de développer un concept de dispositif expérimental permettant d'accueillir un combustible à plaque innovant avant sa mise en fabrication.**

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 comprend 37 alvéoles, dans lesquelles sont accueillis 34 assemblages combustibles, les 3 alvéoles restantes servant à des perspectives expérimentales dites "in-core".

Les cœurs successifs utiliseront des assemblages neufs, résultant d'un processus de fabrication industriel qui garantit leurs caractéristiques dimensionnelles, ainsi que la conformité du combustible aux spécifications.

Le développement et l'amélioration des combustibles à plaques pour les réacteurs expérimentaux ne sont pas testés en dehors d'expériences analytiques ponctuelles et gagneraient à faire l'objet d'une validation intégrale en condition opérationnelle.

Les 3 alvéoles disponibles du cœur RJH pourraient servir à ce processus de validation, tant pour des plaques de combustible innovante pour le RJH, que pour d'autres réacteurs expérimentaux. De nouvelles géométries et de nouveaux matériaux pourraient être testés et pourvoir aux besoins de l'ensemble des exploitants, en substitution

d'autres réacteurs vieillissants, comme BR2 en Belgique.

Cette perspective apporterait des informations sur : Profil interne de puissance, Coefficients de réactivité et Épuisement du combustible.

L'objectif du stage est de concevoir un dispositif innovant, à partir de la feuille blanche.

Les principales disciplines mises en œuvre sont la neutronique (pour ce stage), la thermohydraulique, l'économie et la sûreté (dans une approche collective et itérative).

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

L'étude doit être conçue et caractérisée de manière à satisfaire des contraintes de sûreté et des contraintes opérationnelles liées à l'exploitation du RJH et de plusieurs INB adjacentes.

En particulier, la distribution de puissance devra être aplanie et la réserve de réactivité maximisée.

L'objectif du stage est d'abord de proposer une arborescence de configurations alternatives. Le/la stagiaire proposera une méthodologie d'optimisation pour sélectionner la meilleure.

### ■ 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 :

Stage en binôme  
Neutro/Thermo-hydraulique

### ■ Possibilité de thèse :

Envisageable mais non prévu à court terme

### ■ Contact :

RITTER Guillaume  
Guillaume.Ritter@cea.fr



# Conception thermohydraulique d'un dispositif innovant pour la validation des combustibles à plaque

DER / SERJH / LFSC

**Dans l'intention d'exploiter les emplacements disponibles du cœur RJH pour de la validation technologique, l'objectif est de développer un concept de dispositif expérimental permettant d'accueillir un combustible à plaque avant leur mise en fabrication industrielle.**

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 comprend 37 alvéoles, dans lesquelles sont accueillis 34 assemblages combustibles, les 3 alvéoles restantes servant à des perspectives expérimentales dites "in-core".

Les cœurs successifs utiliseront des assemblages combustibles neufs, résultant d'un processus de fabrication industriel qui garantit leurs caractéristiques dimensionnelles, ainsi que la conformité du combustible aux spécifications.

Le développement et l'amélioration des combustibles à plaques pour les réacteurs expérimentaux ne sont pas testés en dehors d'expériences analytiques ponctuelles et gagneraient à faire l'objet d'une validation intégrale en condition opérationnelle.

Les 3 alvéoles disponibles du cœur RJH pourraient servir à ce processus de validation, tant pour des plaques de combustible innovante pour le RJH, que pour d'autres réacteurs expérimentaux. De nouvelles géométries et de nouveaux matériaux pourraient être testés et pourvoir aux besoins de l'ensemble des exploitants, en substitution d'autres réacteurs vieillissants, comme BR2.

Les principales disciplines mise en œuvre sont la neutronique, la thermohydraulique et la sûreté.

L'objectif du stage est de concevoir un dispositif innovant, à partir de la feuille blanche, d'un point de vue thermohydraulique. Un autre candidat se verra charger de la conception d'un point de vue neutronique et une forte collaboration entre les deux stagiaires sera donc attendue.

L'étude doit être conçue et caractérisée de manière à satisfaire des contraintes de sûreté et des contraintes opérationnelles liées à l'exploitation du RJH. D'un point de vue thermohydraulique, il s'agira d'assurer des conditions d'écoulements (vitesses, pressions, températures ...) permettant le refroidissement efficace des structures, assurant l'équilibre hydraulique du cœur et garantissant l'absence d'ébullition, entre autres.

L'objectif du stage est de proposer une arborescence de configurations alternatives et de les évaluer à l'aide des outils de calcul de l'unité.

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.

Une familiarité avec le logiciel Star-CCM+ ainsi que le fonctionnement sous Linux serait un atout non négligeable pour le candidat,

## ■ Formation souhaitée :

BAC +5 (Diplôme d'ingénieur ou Master 2), mécanique des fluides, physiques, énergie

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

Star-CCM+, CATHARE2, CAO, Python, shell ...

## ■ Mots clés :

Thermohydraulique, CFD, thermique, mécanique des fluides, nucléaire

## ■ Possibilité de thèse :

non

## ■ Contact :

BESSE Lucas  
lucas.besse@cea.fr



## Optimiser la disponibilité du Réacteur Jule Horowitz

DER/SERJH/LFSC

**L'objectif de ce stage est d'optimiser la disponibilité du Réacteur expérimental Jules Horowitz en réalisant une analyse fonctionnelle de l'architecture opérationnelle de l'ensemble des systèmes du réacteur**

La garantie du bon fonctionnement d'une installation nucléaire repose en grande partie sur son architecture fonctionnelle et sa capacité à assurer les trois principales fonctions de sûreté que sont le contrôle de la sous-criticité, l'évacuation de la puissance et le confinement des matières radioactives.

Une indisponibilité d'un système de cette architecture fonctionnelle peut conduire à une dégradation plus ou moins importante des moyens d'exploitation et ne plus garantir une gestion optimale des fonctions de sûreté de l'installation.

L'objectif de ce sujet de stage est de fournir à tout moment à l'exploitant une vision globale de l'architecture fonctionnelle et de l'état opérationnel de l'installation RJH.

L'étude peut se décomposer en deux phases.

Une première phase d'analyse au cours de laquelle le stagiaire devra lister les fonctions opérationnelles remplies par les différents systèmes/circuits de l'installation, identifier les redondances opérationnelles, les interactions éventuelles entre les différents systèmes/circuits et les substitutions et/ou restaurations possibles.

Ces éléments devront être introduits dans un fichier Excel dont la structure est à définir.

Dans une seconde phase, il devra proposer des solutions pour « animer » les éléments précédents afin de visualiser l'impact de la perte d'un équipement d'un système/circuit sur les fonctions analysées dans la première phase et plus généralement l'impact sur la disponibilité globale de l'installation.

Ce travail requiert des connaissances dans le fonctionnement de systèmes/circuits et leur exploitation.

Le candidat devra également présenter des aptitudes en relations humaines à travers les échanges avec le futur exploitant et être force de propositions.

### ■ Formation souhaitée :

LICENCE ou MASTER 1 en thermique, génie des procédés, génie industriel, ingénieurs généralistes

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Excel / VBA / Access

### ■ Mots clés :

Fonctionnement, systèmes, fonctions

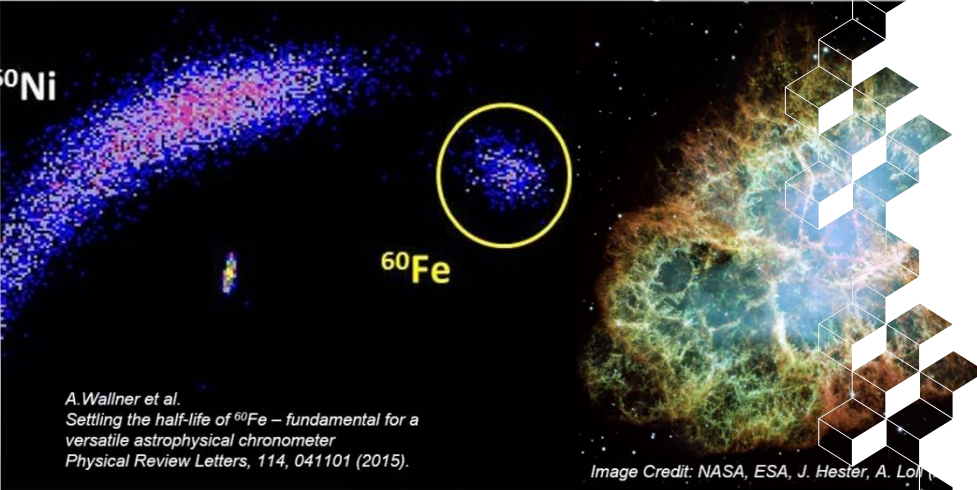
### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

V. NEGRIER  
vincent.negrier@cea.fr





## Adaptation spectrale pour la production de radioéléments artificiels dans le RJH

DER/SERJH/LFSC

**L'objectif de ce stage est d'étudier la faisabilité de la production de radioéléments artificiels par activation neutronique dans le RJH pour des applications en astrophysique.**

Le Réacteur Jules Horowitz est un réacteur de recherche de type MTR (Material Testing Reactor), principalement dédié aux expériences d'irradiation de matériaux. Ces expériences doivent permettre, in fine, d'améliorer les performances et d'accroître la sûreté des installations nucléaires. Ce réacteur constituera une source intense de neutrons qui peut aussi être valorisée pour la production de radioéléments artificiels. Certains radioéléments sont utilisés en médecine, à des fins thérapeutiques (traitement de différents types de cancer) ou de diagnostics (scintigraphies), d'autres ont des applications industrielles variées.

L'objectif de ce stage est d'étudier la faisabilité de la production de radioéléments artificiels par activation neutronique dans le RJH pour certaines applications liées à l'astrophysique. Il s'agit de concevoir un dispositif d'irradiation combinant différents matériaux filtres et permettant d'adapter le spectre neutronique afin d'obtenir des faisceaux de neutrons quasi mono-énergétiques (« purs ») et d'intensités suffisantes dans une région située entre 1 et 100 keV du domaine d'énergie épithermique.

Le stage se déroulera dans l'institut IRESNE du CEA Cadarache, au Département d'Etude des Réacteurs,

au sein du Service d'Exploitation du Réacteur Jules Horowitz.

Les calculs neutroniques seront réalisés par simulations Monte-Carlo à l'aide du code TRIPOLI-4® et en s'appuyant sur la plateforme logicielle nommée « HORUS », dédiée aux études de conception, d'exploitation et de sûreté du RJH.

■ Formation souhaitée :  
Génie Atomique  
Ecole d'ingénieur  
Master 2 en physique, calcul scientifique

■ Durée du stage :  
6 mois

■ Méthode/logiciel(s):  
TRIPOLI-4®, HORUS

■ Mots clés :  
Simulation, Neutronique

■ Possibilité de thèse :  
Non

■ Contact :  
BLANCHET David  
[david.blanchet@cea.fr](mailto:david.blanchet@cea.fr)



# D é p a r t e m e n t d e T e c h n o l o g i e N u c l é a i r e

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

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

Le DTN qui compte environ 250 salariés (dont 200 CDI, 30 doctorants, et post doc, CDD OD ou ATA, apprentis, stagiaires) est organisé en deux services:

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



# Nuclear Technology Department

The Department of Nuclear Technology (DTN) is an R&D unit whose mission is to improve the technology of current nuclear reactors and develop that of future reactors by:

- Studying, designing, and conducting qualification tests on reactor components (assemblies, devices...),
- Studying the behavior and performance of coolants,
- Developing instrumentation for reactor monitoring, process control, and nuclear measurement,
- Modeling radionuclide transfer in the environment and reactors,
- Studying severe accidents.

The DTN, which has around 250 employees (including 200 permanent staff, 30 PhD students, post-docs, temporary contracts, apprentices, and interns), is organized into two services:

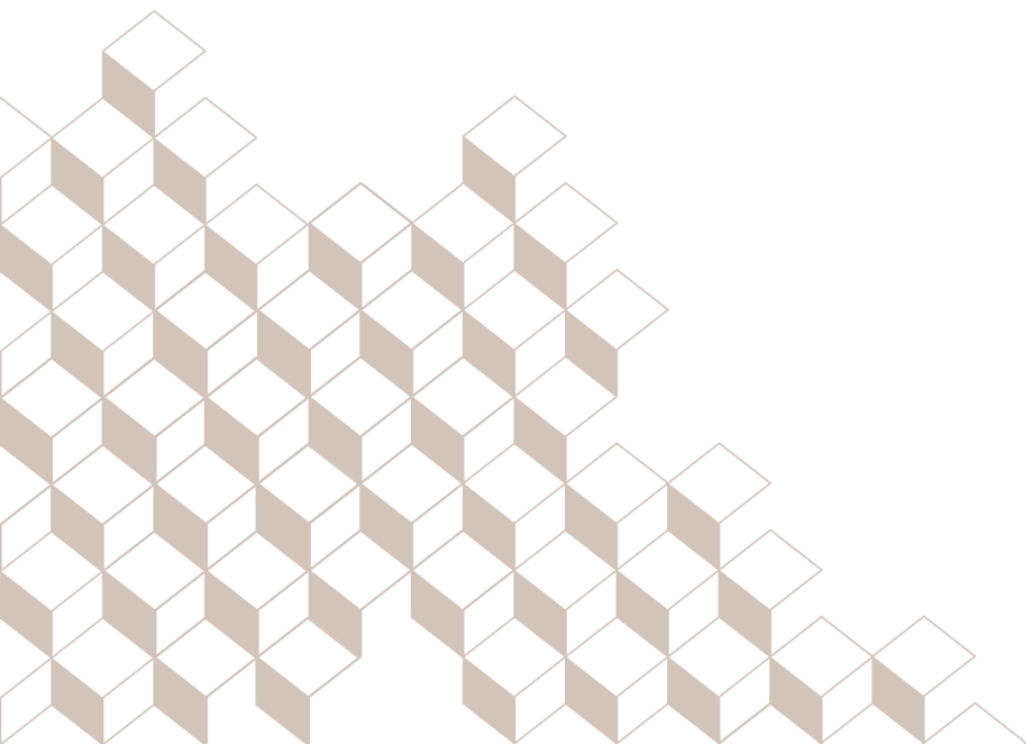
- The Severe Accidents and Transfer Modeling Service (SMTA),
- The Components and Process Technology Service (STCP).



# S M T A

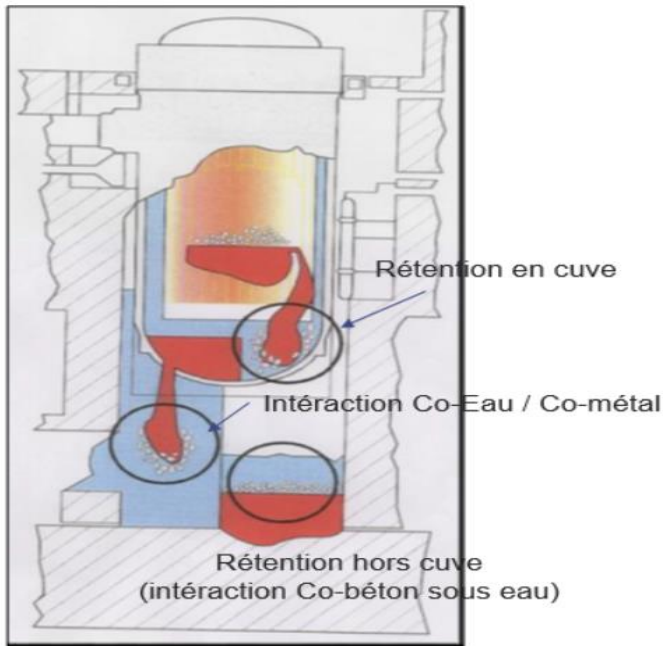
Service mesures et  
modélisation des  
transferts et des  
accidents graves

*Transfer and Severe Accident  
Modelling Unit*



# Interprétation de l'essai d'interaction corium-eau sur le dispositif KROTOS

DTN/SMTA/LEAG



Un accident grave dans un réacteur nucléaire conduit à la fusion du cœur, produisant un matériau liquide à très haute température appelé corium. Le laboratoire LEAG du CEA de Cadarache étudie l'interaction du corium avec différents matériaux, notamment à l'aide de l'installation PLINIUS, qui permet de reproduire à échelle réduite les conditions de fusion du cœur dans un réacteur nucléaire pour mieux comprendre les interactions corium-eau et corium-structures. Ce sujet porte sur l'interaction corium-eau.

Le dispositif KROTOS, sur PLINIUS, permet d'étudier les interactions entre le corium et l'eau.

Les conditions des essais sont définies en collaboration avec les modélisateurs, et les résultats des essais servent à la validation des codes de calculs utilisés pour simuler ces interactions.

Lors de ce stage de 6 mois, le stagiaire analysera un essai d'interaction corium-eau. Les mesures issues des capteurs de pression dynamique, des caméras rapides, et des images radioscopiques devront être post-traitées. L'analyse portera sur la propagation du jet de corium, la fragmentation, ainsi que sur le

phénomène d'explosion de vapeur.

Une amélioration significative de l'instrumentation du dispositif KROTOS a été effectuée en 2024. Le stagiaire devra quantifier l'impact de ces améliorations sur la qualité des données expérimentales obtenues.

Les compétences requises : approche analytique, curiosité, autonomie.

Domaines techniques : **thermohydraulique, traitement de données.**

[www.linktr.ee/leag\\_plinius](http://www.linktr.ee/leag_plinius)

■ Formation souhaitée :  
3<sup>ème</sup> année d'Ecole d'ingénieur

■ Durée du stage :  
6 mois

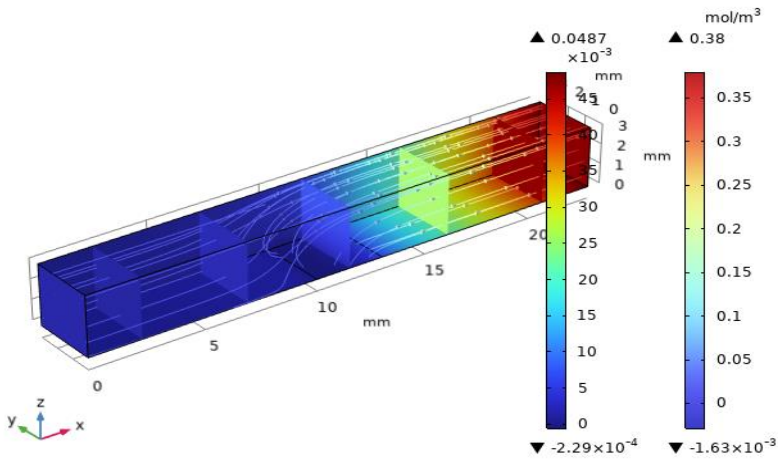
■ Méthode/logiciel(s):  
Diadem (formation prévue), Matlab, Excel, Word

■ Mots clés :  
Corium, essai, instrumentation, analyse, anglais

■ Possibilité de thèse :  
oui

■ Contact :  
PILUSO Pascal  
Pascal.piluso@cea.fr





## Modélisation de la cinétique d'oxydation de matériaux à haute température

DTN/SMTA/LEAG

Ce travail s'inscrit dans le cadre des accidents graves (AG) survenant dans les réacteurs nucléaires. Lors de tels incidents, le cœur du réacteur peut fondre et former un magma liquide à haute température, corrosif, appelé corium. Au cours de l'accident grave, le corium interagit avec une atmosphère oxydante composée d'oxygène et/ou de vapeur d'eau, ce qui entraîne son oxydation. Cette réaction est généralement accompagnée d'un dégagement de chaleur et de dihydrogène. La production de dihydrogène modifie alors le milieu gazeux environnant. L'ensemble de ces mécanismes, qui interagissent de manière plus ou moins forte selon l'état thermodynamique du système, obéit à une cinétique souvent mal connue à haute température.

Le laboratoire LEAG dispose de l'expérience analytique VITOX permettant l'étude de l'oxydation des matériaux à très haute température sous oxygène et vapeur d'eau. VITOX est un four à induction qui permet de chauffer et de faire fondre des matériaux dans la gamme de température [1000 – 3000 °C].

L'objectif de ce stage est de modéliser la cinétique d'oxydation de différents matériaux à partir des données expérimentales issues de l'expérience VITOX et des données provenant de la thermodynamique. Ceci permettra une compréhension fine de la cinétique d'oxydation des matériaux à haute température sous vapeur d'eau.

Un premier travail a été réalisé pour mieux comprendre les physiques mises en jeu en faisant intervenir les nombres de Reynolds et de Péclet. A cet effet, un modèle axisymétrique de VITOX a été établi afin de quantifier l'influence de ces entités adimensionnelles sur le couplage aérodynamique et transport chimique. Le transport de l'oxygène a été modélisé depuis son injection dans la chambre d'essai qui décrit une couche limite à l'interface du matériau chauffé avec une recirculation du gaz au voisinage de l'échantillon à Reynolds élevé.

Un deuxième axe de travail consistait à développer une approche théorique différente pour l'oxydation sous vapeur d'eau, en partant d'une géométrie simple avant de la valider sur la géométrie VITOX. Cette méthode visait à modéliser la cinétique de production de dihydrogène et son interaction avec l'oxygène formant la vapeur d'eau oxydante.

Dans le cadre du stage proposé, le/la stagiaire devra adapter le modèle multiphysique existant sur COMSOL afin d'intégrer le couplage entre la consommation d'oxygène et la production de dihydrogène dans la géométrie VITOX, conformément aux équations fondamentales de transport. Cette adaptation sera d'abord appliquée à l'état solide, puis à l'état liquide.

Les données expérimentales récentes pourront être exploitées pour établir une corrélation entre le nombre de Sherwood (Sh) et les nombres de Reynolds (Re) et de Péclet (Pe), facilitant ainsi la détermination des paramètres influençant les transferts de masse.

### ■ Formation souhaitée :

2<sup>e</sup>/3<sup>e</sup> année Ecole d'Ingénieur

### ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

COMSOL

### ■ Mots clés :

Dynamique des fluides, corium, oxydation, hydrogène.

### ■ Possibilité de thèse :

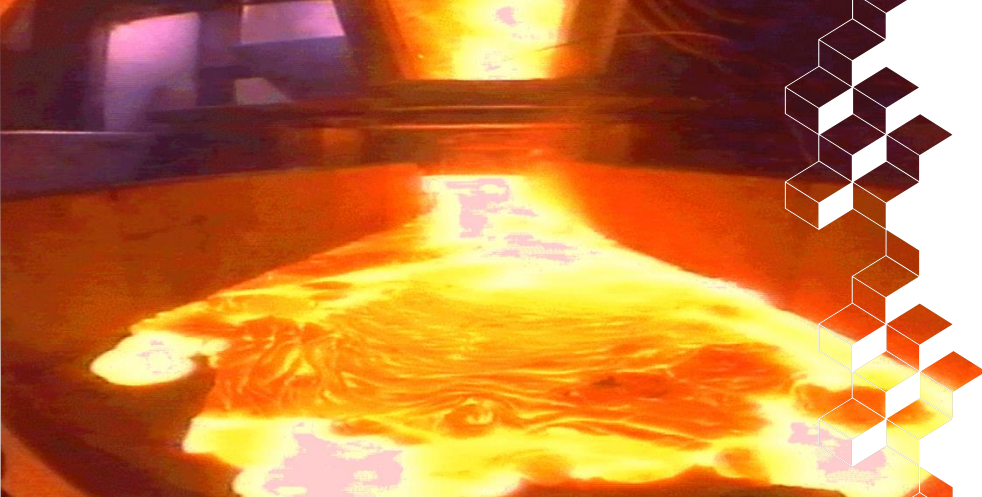
Non

### ■ Contact :

DELACROIX Jules

jules.delacroix@cea.fr





## Obtention de nouvelles compositions de corium à haute température par réaction chimique

DTN/SMTA/LEAG

Un accident grave dans un réacteur nucléaire mène à la fusion du cœur qui produit un matériau liquide à très haute température appelé corium. Le laboratoire LEAG du CEA de Cadarache produit se corium, entre autre, à l'aide d'une réaction chimique appelé réaction thermitique. Le sujet porte sur l'obtention de nouvelles compositions de corium par cette technique.

La réaction thermitique est une réaction d'oxydo-réduction qui a lieu entre un oxyde métallique et un métal. Elle est fortement exothermique et autopropagée. Elle est utilisée au LEAG pour chauffer, en quelques dizaines de seconde, plusieurs dizaines de kilogramme de matière à une température comprise entre 1500°C et 3000°C

La température maximale atteinte durant la réaction thermitique dépend de la composition. Il n'est donc pas possible de fondre toutes les compositions d'intérêt. Des calculs thermodynamiques sont réalisés pour prédire cette température. Cependant des essais de quelques kilogrammes sont systématiquement réalisés pour confirmer les résultats du calcul.

Dans le cadre d'un contrat international, le LEAG doit fondre des nouvelles compositions de corium par réaction thermitique. L'objectif du stage sera de déterminer les compositions de thermitite qui assurent le meilleur compromis entre la composition d'intérêt et la température maximale

atteinte durant la réaction thermitique.

Il s'agit de 1) réaliser les calculs thermodynamiques de prédiction de température maximale de réaction. 2) Participer à la réalisation des essais de réaction thermitique (encadrement des techniciens, suivi du planning...). 3) Dépouiller les résultats des essais et les présenter.

Il sera possible de poursuivre au sein du laboratoire suite au stage dans le cadre du projet international.

Les compétences requises : **management** pour l'encadrement d'une équipe de 3 techniciens, **communication** pour échanges avec une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs et de techniciens d'une dizaine de personne, **autonomie**.

Domaines techniques: **chimie, traitement de données.**

[www.linktr.ee/leag\\_plinius](http://www.linktr.ee/leag_plinius)

### ■ Formation souhaitée :

3<sup>ème</sup> année d'Ecole d'ingénieur

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Diadem (formation prévue), Thermo-Calc (formation prévue), Excel, Word

### ■ Mots clés :

Corium, chimie, essai, management, anglais

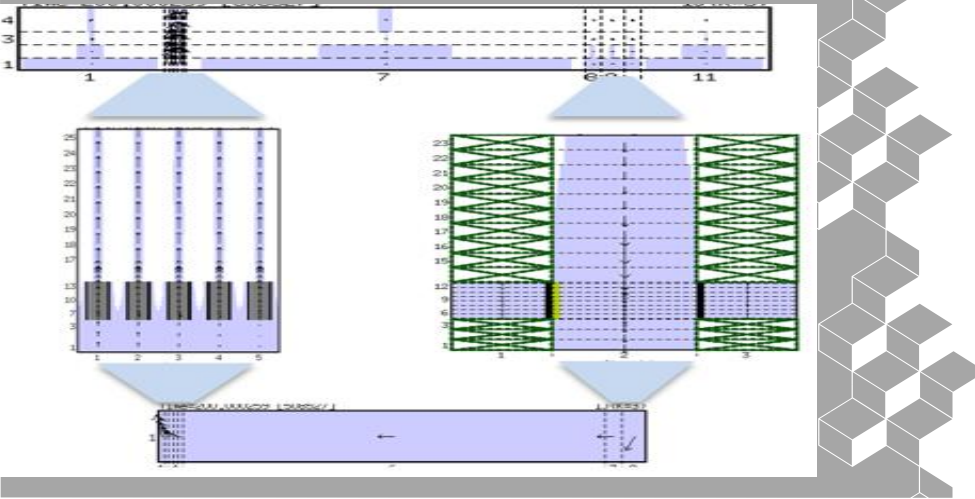
### ■ Possibilité de thèse :

non

### ■ Contact :

DENOIX Arthur  
Arthur.denoix@cea.fr





# Développement d'interfaces pour des codes de calcul scientifique

DTN/SMTA/LMAG

## Stage M2 dédié aux couplages multi-physiques et l'interopérabilité d'un code en vue de son intégration dans une plateforme.

Le CEA a récemment développé des techniques et des standards d'encapsulation de codes de calculs dans le but de favoriser leur intégration au sein d'une plateforme multiphysique (cf. en particulier SALOME, la plateforme de référence thermohydraulique et neutronique CEA-EDF <https://www.salome-platform.org>).

Le code doit être doté d'une API Python qui offre les services décrits par le standard de couplage ICoCo (<https://pypi.org/project/icoco/>). Cette interface permet de piloter la boucle en temps et de réaliser des échanges normalisés entre les codes, en l'occurrence des champs MEDCoupling <https://docs.salomeplatform.org/latest/dev/MEDCoupling/tutorial/index.html>

Par ailleurs, le CEA a développé une librairie Python qui offre une structure objet adaptée à l'écriture d'applications de couplage entre des codes équipés de l'interface ICoCo. Il s'agit de la librairie Objet C3PO décrite ici <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454924001324>

Au LMAG, nous appliquons cette technologie sur notre plateforme SEASON. Elle porte le couplage entre SIMMER et PARIS et sera le cadre de réalisation du sujet proposé.

Travail envisagé : L'API ICoCo de SIMMER a déjà été implémentée. Après la prise en main du code et de ces technologies de couplage, l'objet du stage consiste à construire une implémentation équivalente mais sur le code de neutronique (écrit en java) de la plateforme SEASON. Une fois cette implémentation réalisée, il faudra construire les premiers cas-tests de couplage entre SIMMER et ce code en exploitant la librairie C3PO.

### ■ Formation souhaitée :

M2 avec enseignements physique, mathématiques appliquées, numérique, informatique.

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

ICoCo, MEDCoupling, C3PO.  
Langages : C++, Python, Java, Fortran

### ■ Mots clés :

Couplage, MPI

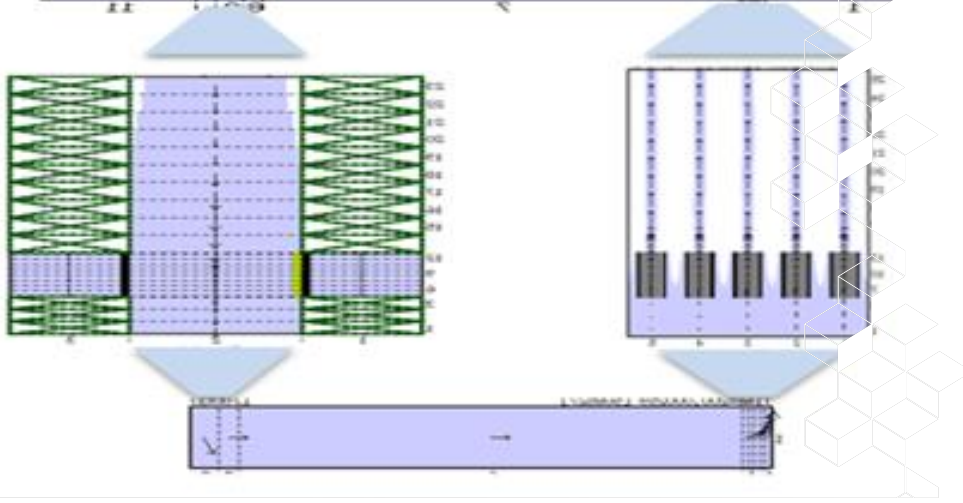
### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

GUBERNATIS Pierre  
[pierre.gubernatis@cea.fr](mailto:pierre.gubernatis@cea.fr)





## Development of interfaces for scientific computing codes

DTN/SMTA/LMAG

### M2 internship dedicated to multi-physics couplings and the interoperability of a code with a view to its integration into a platform.

The CEA has recently developed techniques and standards for encapsulating calculation codes with the aim of promoting their integration within a multiphysics platform (see in particular SALOME, the CEA-EDF thermohydraulic and neutronics reference platform <https://www.salome-platform.org>)

The code must have a Python API that offers the services described by the ICoCo coupling standard (<https://pypi.org/project/icoco/>). This interface makes it possible to control the loop in time and to carry out standardized exchanges between codes, in this case MEDCoupling fields <https://docs.salomeplatform.org/latest/dev/MEDCoupling/tutorial/index.html> !

Furthermore, the CEA has developed a Python library which offers an object structure suitable for writing coupling applications between codes equipped with the ICoCo interface. This is the Object C3PO library described here :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454924001324>

carrying out the proposed subject.

Planned work: SIMMER's ICoCo API has already been implemented. After getting to grips with the code and these coupling technologies, the aim of the internship is to build an equivalent implementation but on the neutronics code (written in Java) of the SEASON platform. Once this implementation has been completed, it will be necessary to build the first coupling benchmarks between SIMMER and this code using the C3PO library.

#### ■ Formation souhaitée :

M2 with physics, applied mathematics, digital, computer science.

#### ■ Durée du stage :

6 months

#### ■ Méthode/logiciel(s):

ICoCo, MEDCoupling, C3PO. C++, Python, Java, Fortran

#### ■ Mots clés :

Coupling, MPI

#### ■ Possibilité de thèse :

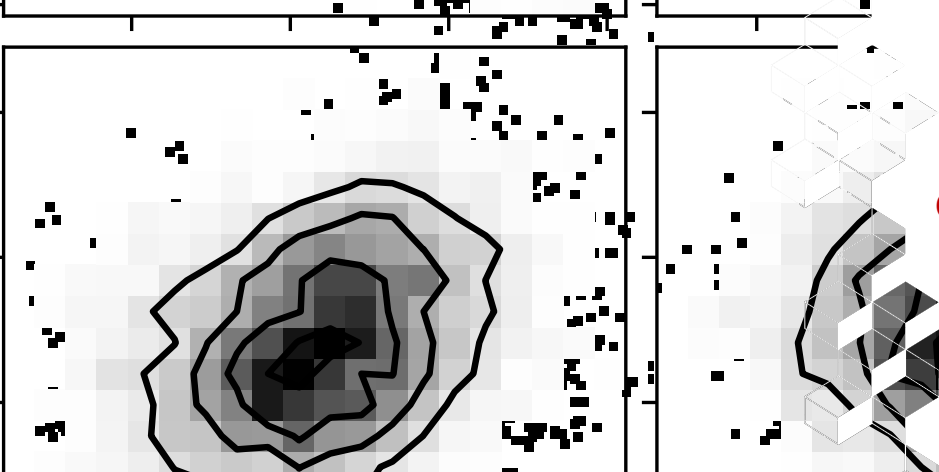
Yes

#### ■ Contact :

GUBERNATIS Pierre  
pierre.gubernatis@cea.fr

At LMAG, we apply this technology on our SEASON platform. It carries the coupling between SIMMER and PARIS and will be the framework for





## Assimilation de données de tension de surface pour améliorer la modélisation thermodynamique des liquides

DTN/SMTA/LMAG

**Un stage alliant modélisation physique et méthodes statistiques pour améliorer la connaissance des propriétés thermodynamiques d'un liquide multicomposant à l'aide de données de tension de surface.**

**Le tout en lien avec la sûreté des réacteurs nucléaires.**

Contexte applicatif : Etude des accidents graves des réacteurs nucléaires 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) pour comprendre sa propagation et éviter sa dissémination dans l'environnement.

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. Simuler la propagation du corium requiert une connaissance des propriétés des matériaux mis en jeu. Du point de vue des propriétés thermodynamiques, le savoir accumulé des programmes expérimentaux est capitalisé sous la forme de bases thermodynamiques. Pour le corium, les propriétés que l'on peut évaluer à partir de ces bases, en particulier, hors de conditions d'équilibre thermodynamique, souffrent d'incertitudes importantes de par la quasi absence de données expérimentales de calorimétrie sur ces liquides à très haute température. Améliorer ces bases est un axe de recherche important que le LMAG mène en collaboration avec d'autres équipes du CEA.

Objectif du stage : Appliquer et tester une méthode proposée et développée dans le cadre de la thèse de A. Tourneix (en cours au LMAG) pour améliorer la calibration du modèle qui représente l'énergie de Gibbs du corium composé d'uranium, zirconium et oxygène. Cette méthode d'assimilation de données propose d'utiliser des données mesurées expérimentalement de tensions de surface entre un tel liquide et un gaz comme source d'information supplémentaire. Pour ce faire, un modèle thermodynamique de la tension de surface qui utilise la représentation de l'énergie de Gibbs du liquide des bases thermodynamiques est mis en œuvre tandis que du point de vue statistique, c'est une approche d'inférence Bayésienne qui est utilisée.

Ce travail de stage participera à la première mise en œuvre de cette méthode pour le corium et l'analyse critique de l'apport de cette méthode dans ce contexte applicatif.

Compétences à acquérir, développer et mettre en œuvre : Compréhension et analyse de processus d'assimilation de données, modélisation thermodynamique d'un liquide multicomposant et sa surface, développement logiciel et calcul scientifique.

■ **Formation souhaitée :**

M2 en physique numérique, science des matériaux avec des notions en science des données

■ **Durée du stage :**

6 mois

■ **Méthode/logiciel(s) :**

OpenCalphad, pyButler, ESPEI (python)

■ **Mots clés :**

Thermodynamique, assimilation de données, réacteurs nucléaires, accidents graves

■ **Possibilité de thèse :**

Non

■ **Contact :**

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



# Assimilation of surface tension data to improve thermodynamic modeling of liquids

DTN/SMTA/LMAG

**An internship combining physical modeling and statistical methods to improve knowledge of the thermodynamic properties of a multicomponent liquid using surface tension data.**

**All related to nuclear reactor safety.**

Context: Study of severe accidents in nuclear reactors, with the aim of improving associated prevention and mitigation measures. More specifically, the behavior of corium (metals and oxides in liquid form resulting from the melting of reactor core materials) to understand its propagation and prevent its dissemination into the environment.

Host scientific team: The LMAG laboratory at CEA works on the modeling and numerical simulation of severe accidents and, in particular, corium behavior. Simulating corium propagation requires knowledge of the properties of the materials involved. From the point of view of thermodynamic properties, the accumulated knowledge from experimental programs is capitalized in the form of thermodynamic bases. In the case of corium, the properties that can be assessed from these bases, particularly out of thermodynamic equilibrium conditions, suffer from significant uncertainties due to the absence of experimental calorimetry data on these liquids at very high temperatures. Improving these bases is an important line of research that LMAG is pursuing in collaboration with other CEA teams.

Internship objective: Apply and test a method proposed and developed as part of A. Tourneix's Ph.D thesis to improve the calibration of the model representing the Gibbs energy of corium (uranium, zirconium and oxygen). This data assimilation method proposes to use experimentally measured surface tension data between such a liquid and a gas as an additional source of information. For this purpose, a thermodynamic model of surface tension using the Gibbs energy representation of the liquid thermodynamic basis is implemented, while from a statistical point of view, a Bayesian inference approach is used.

This internship will be involved in the first application of this method for corium and the critical analysis of the method's contribution in this application.

Skills to be acquired, developed and implemented: Understanding and analysis of data assimilation processes, thermodynamic modeling of a multicomponent liquid and its surface, software development and scientific computing.

## ■ Formation souhaitée :

M2 in computational physics or material science with a background in data science

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

OpenCalphad, pyButler, ESPEI (python)

## ■ Mots clés :

Thermodynamics, data assimilation, nuclear reactors, severe accidents

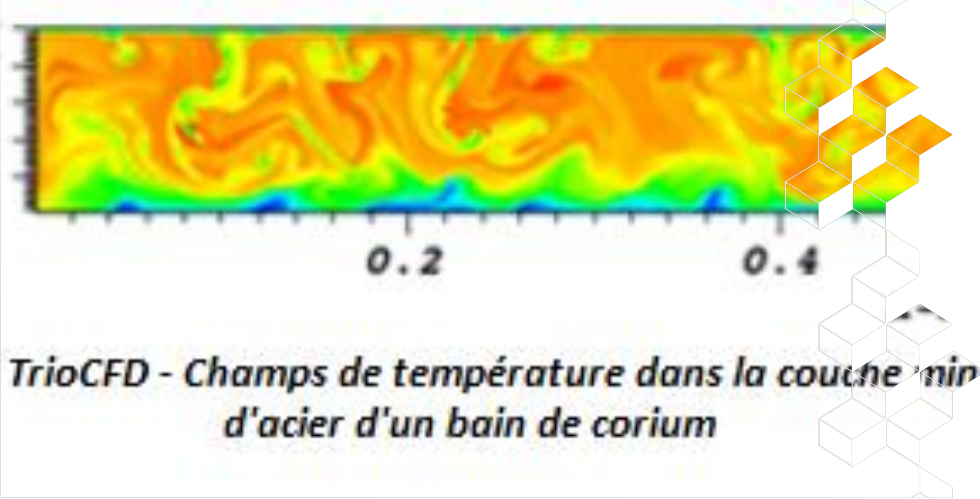
## ■ Possibilité de thèse :

No

## ■ Contact :

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





## Validation des modèles de turbulence d'un code CFD sur les Accidents Graves des réacteurs nucléaires

DTN/SMTA/LMAG

**Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'étude des accidents graves des réacteurs nucléaires avec pour objectif de valider les modèles de turbulence d'un code de calcul CFD pour des cas avec ou sans transferts thermiques.**

Dans les accidents graves de réacteur nucléaire à fission, une partie de l'évènement consiste en un jet de corium (mélange de combustible et éléments structuraux du cœur fondus) interagissant avec le fluide caloporteur du réacteur. On appelle cela FCI pour Fuel Coolant Interaction.

Le LMAG (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves) étudie cet évènement et développe un code de calcul C++ dédié à sa simulation: le code SCONE. Ce code est basé sur la plateforme numérique nommée TRUST (<https://cea-trust-platform.github.io>) et dépend également de la plateforme TrioCFD (<https://trio CFD.cea.fr>) développée au DM2S (CEA Saclay) pour les réaliser des simulations CFD.

Des développements récents ont été effectués dans TrioCFD avec l'intégration de plusieurs modèles de turbulence RANS. Il existe à l'heure actuelle dans le code différents schémas numériques et différents modèles de fermeture RANS (pour les tensions de Reynolds en dynamique et les flux thermiques turbulents en thermique).

Dans l'objectif de valider ce moteur physico-numérique dans un cadre mono et multiphasique, le stagiaire aura pour tâches principales de :

- Se former à l'utilisation du code TrioCFD, au post-traitement des résultats et à l'utilisation de fiche Jupyter intégrant du Python.
- Sélectionner des cas tests pertinents avec des solutions de référence pour valider les modèles de turbulence RANS intégrés dans le code TrioCFD pour des écoulements monophasiques sans convection (fluide isotherme) puis avec convection.
- Construire différents types de maillages (cartésiens, tétraédriques, polyédriques) afin d'évaluer leurs influences sur les résultats.
- Effectuer les calculs, le post-traitement et l'analyse physique et numérique (convergence en maillage).
- Suivant l'avancement des travaux principaux, la validation pourra être menée sur un cas test bifluide (liquide-liquide ou liquide-gaz).

### ■ Formation souhaitée :

3e année d'École d'Ingénieur

Master 2 Universitaire

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Environnement Linux, Code de calcul CEA (TrioCFD), Python

### ■ Mots clés :

Turbulence, Mécanique des fluides, Simulation numérique

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

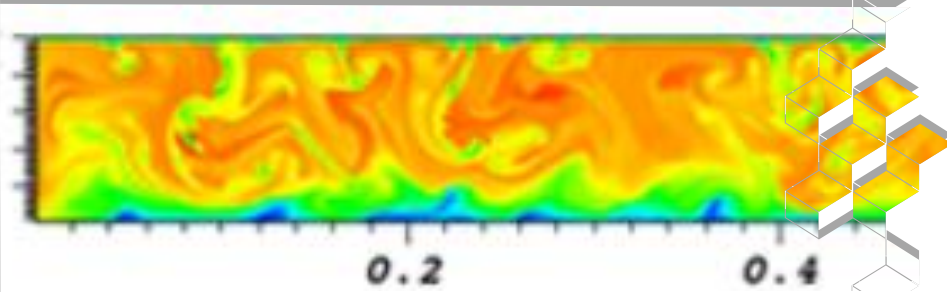
### ■ Contact :

[thibault.desaleux@cea.fr](mailto:thibault.desaleux@cea.fr)

[barbara.bigot@cea.fr](mailto:barbara.bigot@cea.fr)

[jerome.francescatto@cea.fr](mailto:jerome.francescatto@cea.fr)





*TrioCFD – temperature fields in a metallic thin layer above a corium pool.*

## Validation of turbulence models in a CFD code for severe nuclear reactor accidents

DTN/SMTA/LMAG

**This work is part of the study of severe accidents in nuclear reactors, with the aim of validating the turbulence models of a CFD calculation code for cases with or without heat transfer.**

In severe nuclear fission reactor accidents, part of the event consists of a jet of corium (a mixture of molten fuel and core structural elements) interacting with the reactor coolant. This is known as FCI (Fuel Coolant Interaction).

The LMAG (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves) is studying this event, among other, and developing a C++ calculation code dedicated to its simulation: SCONE. This code is based on the TRUST numerical platform (<https://cea-trust-platform.github.io>) and also depends on the TrioCFD code (<https://trio CFD.cea.fr>) developed at DM2S (CEA Saclay) for CFD simulations.

Recent developments have been made in TrioCFD to propose more choice of RANS turbulence models. Various numerical schemes and RANS closure models are currently available in the code (for Reynolds tensions in dynamics and turbulent heat flows in thermodynamics).

With the aim of validating this physico-numerical software in a single-phase and multi-phase framework, the trainee's main tasks will be to:

- Training in the use of the TrioCFD code, post-processing of results and the use of the Jupyter notebook integrating Python.
- Select relevant test cases with referenced solutions to validate the RANS turbulence models integrated into the TrioCFD code for single-phase flows without convection (isothermal fluid) and then with convection.
- Construct different types of mesh (Cartesian, tetrahedral, polyhedral) in order to assess their influence on the results.
- Perform the calculations, post-processing and physical and numerical analysis (mesh convergence).
- Depending on the progress of the main work, validation may be carried out on a bifluid test case (liquid-liquid or liquid-gas).

### ■ Formation souhaitée :

Third year of engineering school  
Master 2

### ■ Durée du stage :

6 months

### ■ Méthode/logiciel(s):

Linux environment, CEA's CFD code TrioCFD, Python

### ■ Mots clés :

Turbulence, Fluid mechanics, Numerical simulation

### ■ Possibilité de thèse :

Yes

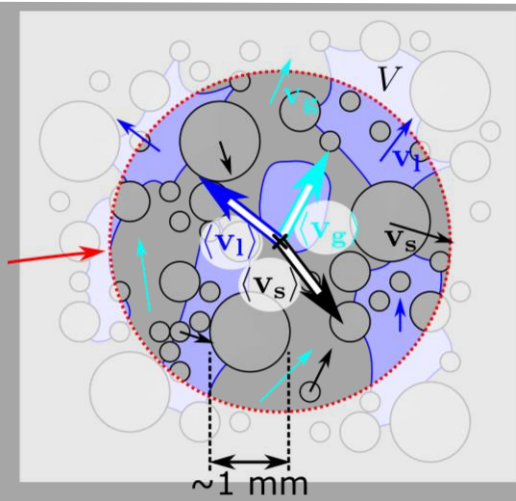
### ■ Contact :

[thibault.desaleux@cea.fr](mailto:thibault.desaleux@cea.fr)

[barbara.bigot@cea.fr](mailto:barbara.bigot@cea.fr)

[jerome.francescatto@cea.fr](mailto:jerome.francescatto@cea.fr)





## Simulation numérique du transfert de chaleur dans un lit de débris

DES/RESNE/DTN/SMTA/LMAG

Dans le cadre des études sur les accidents graves la possibilité de la formation d'un corium en partie basse de la cuve doit être étudiée. Parmi les configurations possibles en fond de cuve lors d'un accident grave de réacteur nucléaire, celle d'un milieu solide poreux (« lits de débris ») est d'intérêt pour de nombreux réacteurs. La modélisation actuelle associée comporte des limites qu'on propose de repousser.

Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'étude des accidents graves des réacteurs à eau légère (REL) dans le but d'améliorer les moyens de prévention et mitigation associés. Dans ce cadre, la phénoménologie du bain de corium (métaux et oxydes sous forme liquide issus de la fusion des matériaux du cœur du réacteur) qui peut se former lors d'un accident nucléaire grave est un élément clé. Par exemple, on peut chercher à maintenir en priorité l'intégrité de la cuve du réacteur, c'est le flux de chaleur transmis par le bain de corium en fond de cuve à la cuve qui conditionne alors la réussite de l'opération.

Dans certaines configurations innovantes, ce corium peut présenter une fraction de solide importante. Dans ce cas, la simulation précise de la thermique au sein de lits de débris (milieu poreux composés de particules solides) devient importante pour évaluer les flux de chaleur à l'interface avec la paroi de la cuve.

Dans ce contexte, le laboratoire LMAG du CEA travaille sur la modélisation d'un bain de corium à deux échelles distinctes :

- une échelle « macroscopique » qui est celle des modèles intégraux de la plateforme PROCOR développée au LMAG ;
- une échelle « mésoscopique »

relative à la taille des mailles (cm, mm) associée à la simulation numérique de la thermohydraulique multiphasique.

Ce stage s'intéressera à la simulation numérique du transfert de chaleur d'un lit de débris chauffé en volume et refroidi à sa frontière externe. Sous l'effet de la chaleur libérée au sein du lit de débris, le « cœur » de ce lit de débris peut fondre et des mouvements convectifs peuvent apparaître et, influencer sur le transfert de chaleur dans le système.

Dans un précédent stage, le LMAG (Laboratoire de Modélisation des Accidents Graves) s'est intéressé à la simulation numérique du transfert de chaleur d'un lit de débris chauffé en volume en implémentant un modèle de la littérature en une dimension dans une maquette python. Par manque de temps, ces développements n'ont pas pu être totalement validés. Le but du stage sera donc, dans une première partie, de poursuivre la validation de ce modèle et des schémas numériques en les comparant aux résultats du papier originel. Dans un second temps, le candidat étendra ces modèles en 2 dimensions en écrivant une maquette en Java. Si le temps le permet, une intégration dans PROCOR et un calcul réaliste de dégradation seront effectués.

### ■ Formation souhaitée :

M1, 3e année Ecole d'Ingénieur ou Master II

### ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Python, schémas numériques en thermohydraulique, PROCOR (langage Java), Linux

### ■ Mots clés :

Lit de débris, transferts thermiques, Modélisation physique


### ■ Possibilité de thèse :

Non prévu

### ■ Contact :

Alexandre LECOANET

[alexandre.lecoanet@cea.fr](mailto:alexandre.lecoanet@cea.fr)



# DIADEME - logiciel de diagnostic des défauts de gainage combustible dans les REP : Développement et validation

DTN/SMTA/LMCT

Pour répondre au besoin d'information sur l'état du cœur lors de l'exploitation d'un réacteur (par exemple pour préparer le remplacement du combustible non étanche au prochain cycle), le CEA a développé, en partenariat avec EDF et Framatome, des méthodes de diagnostic de l'état du cœur à partir du suivi de l'activité en PF dans le circuit primaire. Ces méthodes s'appuient sur la simulation du combustible REP non étanche et du relâchement associé en PF, réalisée avec la plateforme OSCAR (Outil de Simulation de la Contamination en Réacteur). Plus généralement, la plateforme OSCAR permet la simulation du comportement des produits radioactifs dans les circuits des réacteurs et capitalise les études et la recherche menées dans ce domaine.

Le stagiaire aura principalement deux objectifs :

1) Confronter le logiciel DIADEME au Retour d'Expérience (REX) du parc EDF. En effet, à l'issue d'un cycle réacteur, le combustible est déchargé du cœur, et les assemblages (voire les crayons) non étanches sont identifiés par des méthodes de ressuage. La comparaison du diagnostic DIADEME du nombre de CNE au nombre réels de CNE connus pour de nombreux cycles réacteur permettra de constituer le dossier de validation de DIADEME. Ce dossier de validation est à construire suite à une mise à niveau récente des méthodes de DIADEME. Pour ce travail, le stagiaire devra se familiariser avec les méthodes de diagnostic de DIADEME, jusqu'à acquérir l'expertise qui permet le diagnostic final pour chaque cas réacteur.

2) Définir les bases et initier le développement d'une application autonome (par exemple sous Python), reprenant les méthodes de diagnostic de DIADEME, dans l'objectif de s'affranchir de Microsoft ACCESS, considéré comme non suffisamment robuste par les partenaires. L'application doit permettre d'appliquer les méthodes de diagnostic à des données d'entrées issues d'une base de données (requêtes à développer), et présenter les résultats sous forme conviviale.

Le stagiaire sera encadré par un ingénieur expert en contamination des circuits des REP en PF et oxyde combustible, et bénéficiera de l'environnement de développement de la plateforme OSCAR (équipe de 5 ingénieurs).

## ■ Formation souhaitée :

Ecole d'ingénieur généraliste

## ■ Durée du stage :

5 à 6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Python, SQL

## ■ Mots clés :

Défauts de gainage, diagnostic, REP

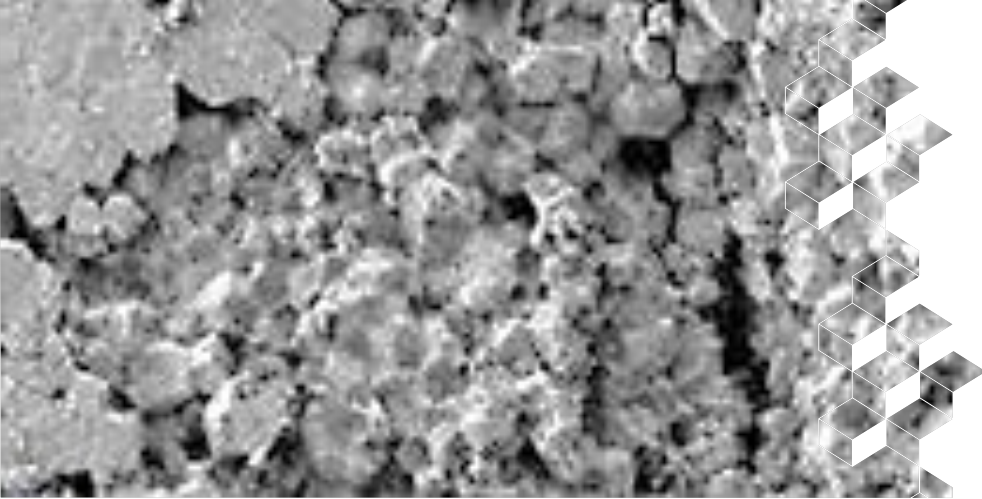
## ■ Possibilité de thèse :

non

## ■ Contact :

GENIN Jean-Baptiste  
jean-baptiste.genin@cea.fr





## Optimisation de la tenue en corrosion d'une céramique électrolyte dans le sodium liquide

DTN/SMTA/LMCT

**Le sodium liquide est un caloporteur de choix, retenu dans plusieurs projets de surgénérateurs de production électrique ou de chaleur. Parmi les nombreux paramètres de pilotage du procédé, le taux d'oxygène dissous dans le sodium est crucial pour des questions de sûreté et de productivité.**

**Le LMCT travaille à la conception d'une sonde potentiométrique immergée capable de monitorer en temps réel ce paramètre.**

Les céramiques oxydes d'hafnium dopées à l'yttrium peuvent servir d'électrolytes pour des sondes potentiométriques à oxygène dans le sodium (centrales nucléaires ou solaires). Cependant, des études récentes ont montré que des attaques aux joints de grains dans le métal liquide engendraient une fragilisation de ces céramiques. Une thèse précédente a montré qu'il était possible de caractériser cette attaque en couplant diverses techniques : fractographie au microscope électronique à balayage, EDS, spectroscopie d'impédance... Elle a également montré que la microstructure obtenue pour la céramique dépendait de plusieurs paramètres, mais les liens avec la tenue dans le sodium sont moins clairs. Les céramiques utilisées sont synthétisées au laboratoire par voie humide, afin de maîtriser les paramètres microstructuraux.

Le sujet de stage proposé a pour but, sur des pastilles d'hafnie élaborées par voie humide au laboratoire de :

Diminuer le taux de dopage en yttrium

Utiliser un nouveau dopant trivalent (Gd)

Tester les différents matériaux élaborés en corrosion sodium (manipulation du sodium en boîte à gants)

Réaliser des caractérisations métallographiques (MEB, EDS...) avant et après attaque par le sodium

Ceci afin d'obtenir, dans le cadre d'une thèse en cours, des matériaux avec les propriétés recherchées et d'établir des cinétiques de corrosion qui alimenteront

des modèles qui permettront d'estimer les durées de vie des céramiques dans des environnements représentatifs des milieux industriels.

Le candidat aura en charge tout d'abord la fabrication des pastilles par voie hydroxyde avec les nouvelles compositions et microstructure, leur caractérisation par diverses méthodes (MEB, DRX, BET...). Il réalisera ensuite les essais de corrosion en sodium, en testant plusieurs paramètres expérimentaux (température, teneur en oxygène...). Il caractérisera finalement les pastilles après passage en sodium (par MEB en fractographie, spectroscopie d'impédance....).

Le but final est de comprendre le lien entre la composition, la microstructure des matériaux et leur résistance au sodium.

Le laboratoire d'accueil est le LMCT (Laboratoire de Maîtrise de la contamination, chimie des Caloporteurs et du Tritium) du CEA Cadarache qui travaille depuis une décennie sur le développement des sondes à oxygène pour le sodium liquide. Il dispose des moyens d'élaboration et de caractérisation des céramiques.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur ou Master 2 en science des matériaux

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

### ■ Mots clés :

Céramique oxyde, électrolyte, sodium, corrosion, cinétique

### ■ Possibilité de thèse :

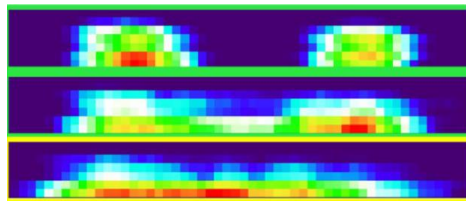
NON

### ■ Contact :

Claire.canas@cea.fr

Laurent.brissonneau@cea.fr





# Reconstruction tomographique 3D de sources neutroniques par panneaux BCS (Boron Coated Straw)

CEA/DES/RESNE/DTN/SMTA/LMN

**Ce stage s'inscrit dans le cadre des études de l'apport de l'imagerie par tomographie d'émission neutronique pour la caractérisation radiologique de colis de déchets. Il répond tout particulièrement à la problématique de l'incertitude d'estimation de la masse de matière nucléaire induite par la méconnaissance de la distribution spatiale du terme source neutronique. L'objectif du stage est d'étudier de nouvelles approches algorithmiques pour le débruitage et la reconstruction 3D des images obtenus avec le panneau d'imagerie BCS.**

La caractérisation radiologique du terme source dans un fût de déchets se fait actuellement au travers de différentes techniques de mesures neutroniques et gamma passives et actives développées au Laboratoire de Mesures Nucléaires (LMN). L'idée proposée est d'obtenir ces informations au travers de méthodes de tomographie basées sur l'exploitation des émissions neutroniques passives ou actives. Aujourd'hui, un poste de mesure équipé de compteurs à dépôt de bore sous forme de pailles [1], sensibles aux neutrons thermiques est envisagé afin d'obtenir des signaux utiles sous la forme de sinogrammes. Par la suite, ces sinogrammes sont directement exploités par des algorithmes déjà utilisés dans le cadre de l'imagerie gamma, afin de reconstruire les images neutrons en 3D.

De nombreuses mesures [2] au sein de la casemate existante au LMN (BIHAN) avec deux panneaux d'imagerie et différentes matrices homogènes (organique et métallique) ont montré qu'il est envisageable de reconstruire une image 3D d'une source neutronique. Cependant, un travail sur les algorithmes de traitement d'images ainsi que sur le dimensionnement d'un poste équipé de plusieurs détecteurs BCS (Boron Coated Straw) est encore nécessaire afin d'améliorer les performances de reconstruction.

D'autres algorithmes de reconstruction pourront être également étudiés tels que des algorithmes itératifs de reconstruction (MLEM : Maximum Likelihood Expectation Minimization), l'utilisation du machine learning ou la mise en œuvre de réseaux de neurones afin d'améliorer la résolution spatiale

Les différentes étapes envisagées sont

- Optimisation et dimensionnement du poste de mesure par simulations Monte Carlo (code MCNP)
- Etude et optimisation des algorithmes pour le débruitage et la reconstruction 3D des images mesurées par tomographie d'émission neutronique.

Ce plan de travail pourra évoluer en fonction de l'avancement des actions et des résultats obtenus

## Bibliographie

1. <https://proportionaltech.myshopify.com/>
2. M. BEN MOSBAH, C. ELEON & al, Boron-Coated Straws Imaging Panel Capability for Neutron Emission Computed Tomography for Source Localization Inside Radioactive Drums, IEEE TNS Vol 69, issue 4 P 804-810, April 2022
3. Pelowitz, Denise B., MCNP6 USER'S MANUAL, LA-CP-13-00634. in This document is provided in the MCNP6 release package available from RSICC and is not accessible from the MCNP website. Code Version 6.1. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory, 2013.
4. Proof of Concept for Safeguards of Spent Nuclear Fuel Using Passive Fast Neutron Montague, Mairead E and Hausladen P A Tennessee s n 2022

## ■ Formation souhaitée :

École d'ingénieur ou Master 2 (stage de fin d'études)

## ■ Durée du stage :

6 mois minimum

## ■ Méthode/logiciel(s):

MCNP, Python

## ■ Mots clés :

Mesure neutronique passive et active, tomographie d'émission neutronique 3D

## ■ Possibilité de thèse :

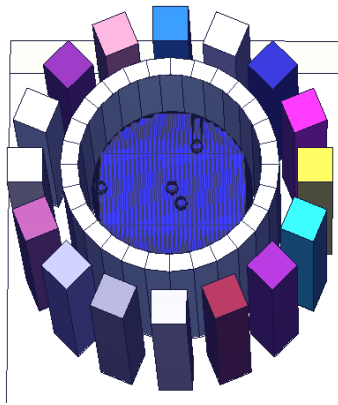
non

## ■ Contact :

BEN MOSBAH Mehdi & ELEON  
Cyrille  
[mehdi.benmosbah@cea.fr](mailto:mehdi.benmosbah@cea.fr)

[cyrille.eleon@cea.fr](mailto:cyrille.eleon@cea.fr)





# Évaluation des capacités du code PHITS pour la simulation des mesures neutroniques avec scintillateurs plastiques PVT pour la caractérisation des déchets radioactifs

CEA/DES/RESNE/DTN/SMT/LMN

## Ce stage s'inscrit dans le cadre des études de performances des scintillateurs plastiques PVT pour la caractérisation des déchets radioactifs

Le Laboratoire de Mesures Nucléaires (LMN) explore depuis plusieurs années l'utilisation des scintillateurs plastiques PVT (polyvinyle toluène) pour les mesures neutroniques dans le cadre de la gestion des déchets radioactifs. Ces scintillateurs représentent une alternative aux compteurs à hélium 3, devenus très coûteux, avec l'avantage de temps de réponse plus rapides. Cependant, ces scintillateurs sont sensibles aux rayonnements gamma et à la diaphonie neutronique ou gamma entre détecteurs voisins, provoquant des coïncidences parasites dues aux réactions ( $\alpha, n$ ) ou à des sources gamma, ce qui peut entraîner une surestimation du signal utile du plutonium. Une méthode innovante de discrimination des coïncidences utiles et parasites impliquant au moins trois particules, basée sur le temps de vol, a été étudiée et validée expérimentalement en mode passif, puis breveté [1]. Cette méthode permet d'identifier les types de coïncidences ( $\gamma\gamma\gamma$ ,  $\gamma n n$ ,  $\gamma n$ ,  $n n n$ ), car les scintillateurs PVT ne permettent pas de discriminer expérimentalement les neutrons des rayonnements gamma. Elle est utilisée pour discriminer le signal utile de fission spontanée des signaux parasites dus aux réactions ( $\alpha, n$ ) ou à la présence d'émetteurs gamma comme le  $^{60}\text{Co}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ , permettant ainsi d'estimer la masse de plutonium dans les fûts de déchets radioactifs.

Le code de calcul Monte Carlo PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) [2] est un outil adapté pour la modélisation et la simulation de systèmes de détection neutronique. Lors d'études précédentes, PHITS a montré son efficacité pour estimer les performances d'un poste de mesure neutronique équipé de compteurs  $^3\text{He}$ . Son application dans la simulation d'un poste équipé de scintillateurs plastiques pourrait permettre de valider et d'optimiser les systèmes de mesure en cours de développement.

L'objectif de ce stage est de tester et d'évaluer les capacités du code de calcul PHITS pour la simulation de mesures

neutroniques utilisant des scintillateurs plastiques PVT. Le stagiaire devra modéliser un poste de mesure neutronique avec scintillateurs, comparer les résultats obtenus avec PHITS à ceux du code de référence MCNP-POLIMI [3], et analyser les performances du code pour l'estimation de grandeurs d'intérêt telles que les coïncidences réelles issues de fissions spontanées et les temps de vol utilisés pour la discrimination des coïncidences utiles et parasites.

Déroulement du stage :

- Modélisation de systèmes de détection neutronique avec scintillateurs PVT dans PHITS.
- Utilisation d'outils de traitement des données (Python et ROOT [4]) pour analyser les résultats et mettre en forme les données de simulation.
- Évaluation des performances en termes d'efficacité de détection et de traitement des signaux réels et parasites (comptage de multiplicités, coïncidences réelles et parasites, diaphonie gamma/neutronique).

### Bibliographie

1. European patent EP3835831B1, V. Bottau, R. De Stefano, C. Carasco, C. Eleon, B. Perot, Method for radiation detection comprising neutron-gamma discrimination and corresponding system
2. PHITS Office, « Basic Lecture I: Geometry and Source Definition for MCNP users ». Distribué avec le Package PHITS, février 2020
3. S. A. Pozzi et al., MCNPX-PoliMi for nuclear nonproliferation applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 694, pp. 119–125, Dec. 2012.
4. « minuit.pdf ». Consulté le: 1 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://root.cern.ch/download/minuit.pdf>

### ■ Formation souhaitée :

Licence 3, Master 1, 1<sup>ère</sup> ou 2<sup>ème</sup> année d'école d'Ingénieur

### ■ Durée du stage :

3 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

PHITS, MCNP, ROOT, Python

### ■ Mots clés :

Mesure neutronique passive, scintillateurs plastiques PVT

### ■ Possibilité de thèse :

non

### ■ Contact :

BOTTAU Vincent & ELEON Cyrille

[vincent.bottau@cea.fr](mailto:vincent.bottau@cea.fr)

[cyrille.eleon@cea.fr](mailto:cyrille.eleon@cea.fr)





# Application des méthodes statistiques avancées pour la caractérisation des déchets radioactifs

CEA/DES/IRENE/DTN/SMTA/LMN

**Ce sujet de stage s'inscrit dans le cadre des études sur la réduction des incertitudes pour la détermination de la masse de matière radioactive dans les colis de déchets radioactifs.**

La gestion de déchets radioactifs en termes de caractérisation radiologique est un élément important afin de se conformer aux normes de sûreté nucléaire et de radioprotection des travailleurs et de l'environnement. Le **Laboratoire de Mesures Nucléaires**, situé au **CEA Cadarache** est spécialisé dans diverses méthodes de caractérisation radiologique des colis de déchets nucléaires, et par ce biais, a acquis une grande expertise dans ce domaine.

Parmi des différents méthodes de caractérisation, l'Interrogation Neutronique Active (INA) et la Mesure Neutronique Passive (MNP) [1,2] sont les méthodes les plus efficaces afin d'obtenir des informations sur la quantité de la matière nucléaire que recèle les colis de déchets. Plus précisément, cette évaluation de la masse dépend du taux de comptage neutron dans les détecteurs, de la nature de la matrice et de la localisation de la matière nucléaire : cette dépendance s'exprime par le coefficient d'étalonnage [2].

Cependant, **l'absence des modèles phénoménologiques et la complexité du comportement du coefficient d'étalonnage en fonction d'autres caractéristiques du colis (comme le taux d'absorbant, la densité etc.) nécessitent l'introduction et l'application de méthodes statistiques avancées** [3]. Les modèles qui sont utilisés jusqu'ici, entre le coefficient d'étalonnage et les différentes caractéristiques de la matrice ont été établis par régression multilinéaire [2] qui se caractérise par une incertitude assez élevée.

L'objectif de ce stage est, premièrement, d'appliquer et tester des méthodes du **Machine Learning** et **Bayésiennes** (comme par exemple, le processus Gaussien [4]) sur un jeu de données simulées et d'essayer d'optimiser les différents paramètres afin d'établir une relation qui décrit mieux les données. Des comparaisons avec des **données expérimentales**, acquises sur des installations du CEA Cadarache seraient aussi effectuées. Le deuxième objectif important est **la quantification des incertitudes** des modèles utilisés et leur comparaison.

Dans l'ensemble, pendant ce stage le candidat acquerra des compétences sur **des méthodes statistiques avancées, le traitement et la gestion des données** ainsi que **leur analyse**, méthodes qui sont utilisées dans des divers domaines dans **la recherche** et **l'industrie**. Il aura l'opportunité de travailler dans un laboratoire multithématique ayant un savoir-faire éprouvé sur la recherche en lien avec les mesures nucléaires non destructives.

## Bibliographie

1. B. Pérot et al., EPJ Nuclear Sci. Technol. 4, 3 (2018) 1-24
2. R. Antoni et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 895 (2018) 144-149
3. M. Reginatto et al., Review of Scientific Instruments 79, 023505 (2008)
4. M. Ebdon, Gaussian Processes for Regression: A Quick Introduction, arXiv:1505.02965v2 (2008)

## ■ Formation souhaitée :

Ecole d'Ingénieurs

Master 2

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Neutronique,  
Simulation Numérique,  
Python

## ■ Mots clés :

Machine Learning, Méthodes Bayésiennes, Interrogation Neutronique Active

## ■ Possibilité de thèse :

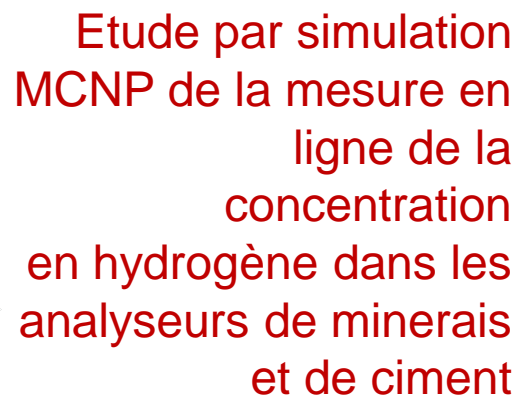
Oui

## ■ Contact :

CHALIL Achment

achment.chalil@cea.fr





Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le CEA et Sodern (ArianeGroup), qui commercialise des analyseurs de matières en ligne (CNA) pour déterminer la composition d'un flux de matière première défilant sur la bande convoyeuse, permettant ainsi un contrôle en ligne de sa composition élémentaire.

Thomas Marchais, Cédric Carasco , Bertrand Pérot  
[thomas.marchais@cea.fr](mailto:thomas.marchais@cea.fr)  
[cedric.carasco@cea.fr](mailto:cedric.carasco@cea.fr)  
[bertrand.perot@cea.fr](mailto:bertrand.perot@cea.fr)

On combinera ensuite toutes ces informations avec des méthodes de régression déjà utilisées au laboratoire en vue d'améliorer la précision sur la teneur en hydrogène et on mettra en évidence les données d'entrées les plus importantes pour réduire l'incertitude, de façon à modifier le moins possible le design (voir schéma et modèle MCNP ci-dessous) et le coût des analyseurs CNA existants.





# Caractérisation d'aimants NdFeB par activation neutronique en vue de leur recyclage (possibilité de thèse)

DTN/SMTA/LMN

**Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une collaboration en construction entre le CEA et le Forschungszentrum de Jülich (FZJ) pour caractériser des aimants par inspection neutronique pour pouvoir les recycler.**

Les aimants de type NdFeB sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leurs propriétés magnétiques exceptionnelles. On y ajoute couramment quelques % (en masse) de dysprosium pour améliorer leur tenue à la température et leur coercivité (résistance à la démagnétisation). Dans le cadre de la transition énergétique, le besoin en terres rares, notamment en néodyme et dysprosium, devrait croître d'environ 250 % d'ici 2030, ce qui fait de l'approvisionnement en terres rares un enjeu hautement stratégique.

Le recyclage des aimants est une voie d'approvisionnement intéressante en terres rares car il permet non seulement de protéger les ressources primaires et d'éviter les pollutions inhérentes aux activités minières, mais aussi parce que l'exploitation de terres rares à partir de ressources secondaires pourrait s'avérer moins coûteuse en énergie et assurer un approvisionnement pour des pays comme la France qui n'ont pas de ressources minières en terres rares.

Dans les ressources primaires, les terres rares se retrouvent en effet souvent mélangées dans le minerai et sont difficilement séparables du fait de leur propriétés physiques et chimiques similaires. Pour recycler efficacement les aimants, il peut être intéressant de les caractériser avant de les traiter. Par exemple, le retraitement des aimants par l'hydrogène est une des approches les plus efficaces mais qui reste encore peu utilisée industriellement en raison de sa complexité et des nombreux paramètres qui affectent les propriétés magnétiques de l'aimant final. Ainsi, la quantité de dysprosium dans l'aimant initial affecte non seulement les paramètres du processus de retraitement, mais diminue aussi le taux de recouvrement de la coercivité de l'aimant final. La présence de cobalt, de gadolinium, de niobium ou de zirconium affecte aussi la cinétique du processus d'hydrogénation.

Le Laboratoire de Mesure Nucléaire (LMN) du CEA Cadarache, à l'institut IRESNE, étudie la possibilité de déterminer la teneur en terres rares dans les aimants par interrogation neutronique (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis ou PGNA). Cette approche consiste à interroger les échantillons à analyser avec un générateur électrique émettant des impulsions de neutrons rapides via la réaction

$3H + 2H \rightarrow \alpha + n(14 \text{ MeV})$ . Entre deux impulsions, les neutrons rapides se thermalisent dans les parois en graphite et polyéthylène de la cellule de mesure, puis la spectrométrie des rayonnements gamma émis par capture radiative permet d'identifier les noyaux composant l'objet inspecté.

L'intérêt d'une telle approche tient dans le fait que des éléments comme le dysprosium ou le néodyme ont une section efficace de capture radiative élevée (respectivement 944 et 49.5 barns) et que les neutrons peuvent sonder en profondeur d'importants volumes de matière (plusieurs litres), contrairement à d'autres techniques de mesure non destructives comme la FXL (fluorescence des rayons XL) ou la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) qui sont essentiellement surfaciques (profondeur de l'ordre du mm). Cependant, la faisabilité de la PGNA à des cadences imposées par l'industrie du recyclage reste à prouver.

Une thèse récemment effectuée au LMN a montré que la PGNA avec mesure en coïncidence des rayonnements gamma émis en cascade avec des scintillateurs NaI(Tl) de grand volume permettrait de détecter le dysprosium plus rapidement que l'approche classique à base de détecteur au germanium hyper pur. Les pistes de recherche ouvertes sont à approfondir afin de vérifier que cette nouvelle approche répond bien aux besoins industriels. Le stage vise donc à exploiter les données déjà mesurées avec le système.

La signature de plusieurs éléments purs (Dy, S, Fe, Ni, Co, ...) a été mesurée et servira à détecter et quantifier ces éléments par déconvolution des spectres associés à des objets composites, tels que des aimants NdFeB contenant différentes quantités de Dy, ou des rotors contenant ces aimants. Diverses méthodes mathématiques pourront être investiguées (Machine Learning, réseaux de neurones, approche probabiliste Bayésienne..., avec des outils comme Python ou R), avec en outre des simulations Monte Carlo (modèle numérique avec le code PHITS établi lors de la thèse précédente) pour l'analyse physique des phénomènes d'influence, comme l'auto-absorption des neutrons thermiques ou l'atténuation gamma dans les échantillons.

## ■ Formation souhaitée :

Grandes Écoles d'Ingénieurs,  
Master 1 ou 2

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

MCNP, régression multi-paramétrique, Machine Learning, etc.

## ■ Mots clés :

Economie circulaire, mesure nucléaire, simulation Monte Carlo

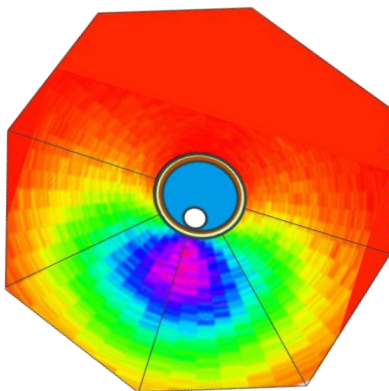
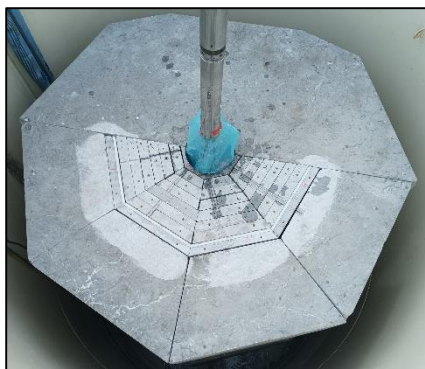
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

Cédric Carasco, Bertrand Pérot, Laurent Loubet  
[cedric.carasco@cea.fr](mailto:cedric.carasco@cea.fr)  
[bertrand.perot@cea.fr](mailto:bertrand.perot@cea.fr)  
[laurent.loubet@cea.fr](mailto:laurent.loubet@cea.fr)





# Modélisation Monte-Carlo de sondes diagraphiques nucléaires en environnement de puits pétroliers tubés

DTN/SMTA/LMN

**Ce stage s'inscrit dans une collaboration entre le CEA et TotalEnergies pour développer des méthodes de simulation rapide des diagraphies nucléaires, afin d'évaluer efficacement les propriétés des réservoirs dans les puits tubés.**

Dans les puits pétroliers, de nombreuses sondes diagraphiques, dont certaines fonctionnant sur des principes de physique nucléaire, sont couramment utilisés pour mesurer les propriétés pétrophysiques des réservoirs rocheux. Ces outils multi-détecteurs, comme la sonde de porosité hydrogène (mesure de rétrodiffusion neutron-neutron, c'est-à-dire avec une source et des détecteurs neutroniques), la sonde de litho-densité et de facteur photoélectrique (mesure gamma-gamma), la sonde Sigma (mesure neutron-gamma de la section efficace d'absorption par activation neutronique, qui permet aussi la mesure des ratios carbone/oxygène et inélastique/capture), sont utilisées pour caractériser les formations géologiques et estimer les quantités d'hydrocarbures à proximité du puits.

Ces mesures, appelées diagraphies, correspondent à des enregistrements de grandeurs physiques (comme des taux de comptages ou des spectres temporels et/ou en énergie de neutrons ou de gammas) en fonction de la profondeur dans le puits. Les sondes diagraphiques nucléaires ont d'abord été développées pour réaliser des mesures quantitatives en conditions de puits ouvert (*open hole*) où elles sont en contact direct avec la roche, mais une fois le puits foré, pour le sécuriser et éviter l'effondrement des parois, un tubage en acier (*casing*) est installé et cimenté. On parle alors de mesures en conditions de puits tubé (*cased hole*). Avec la raréfaction des ressources en hydrocarbures, le nombre de projets d'exploration tend à diminuer et les compagnies pétrolières ont de plus en plus de puits tubés dont il faut maintenir les capacités de production, ou qu'il faut abandonner en fin de vie tout en s'assurant de leur étanchéité. Par conséquent, l'enjeu industriel n'est pas seulement de mesurer les propriétés

pétrophysiques des formations rocheuses mais également de caractériser les composants du forage (fluides, tubage, ciment).

En raison du grand nombre d'inconnues, une approche d'inversion multi-physique prenant en compte toutes les diagraphies nucléaires est nécessaire. La convergence de l'inversion multi-physique vers une solution fiable, c'est-à-dire une formation géologique et une architecture de puits proches de la réalité, repose sur la précision et la justesse des diagraphies obtenues par simulation. Celles-ci doivent être aussi proches que possible des diagraphies acquises dans le puits tubé réel que l'on cherche à inverser. La simulation nucléaire Monte-Carlo traditionnelle, utilisant les codes de transport de particules comme MCNP, GEANT4 ou PHITS, n'est pas suffisamment rapide (plusieurs heures pour simuler une simple diagraphie de taux de comptage). Pour résoudre ce problème, l'Université du Texas à Austin (USA) a développé un simulateur rapide de diagraphies nucléaires (quelques secondes pour prédire une diagraphie de taux de comptage). Il repose sur les fonctions de réponse en 3D (aussi appelées fonctions sensibilité) des différents détecteurs des sondes nucléaires. Les algorithmes de prédiction rapide, initialement développés pour les puits ouverts en exploration pétrolière, ont été étendus à l'environnement de puits tubé dans le cadre d'une thèse CIFRE et d'une collaboration entre TotalEnergies et le CEA. Les fonctions de sensibilité utilisées par ces algorithmes seront calculées lors de ce stage grâce à des simulations nucléaires Monte-Carlo qui permettront d'estimer la contribution de chaque élément du forage (fluide, tubage, ciment, formation rocheuse) au signal mesuré.

## ■ Formation souhaitée :

Grandes Écoles d'Ingénieurs, Master 2

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

MCNP, PHITS, GEANT4

## ■ Mots clés :

Diagraphies nucléaires, Puits pétroliers, Sondes multi-détecteurs, Simulation Monte-Carlo

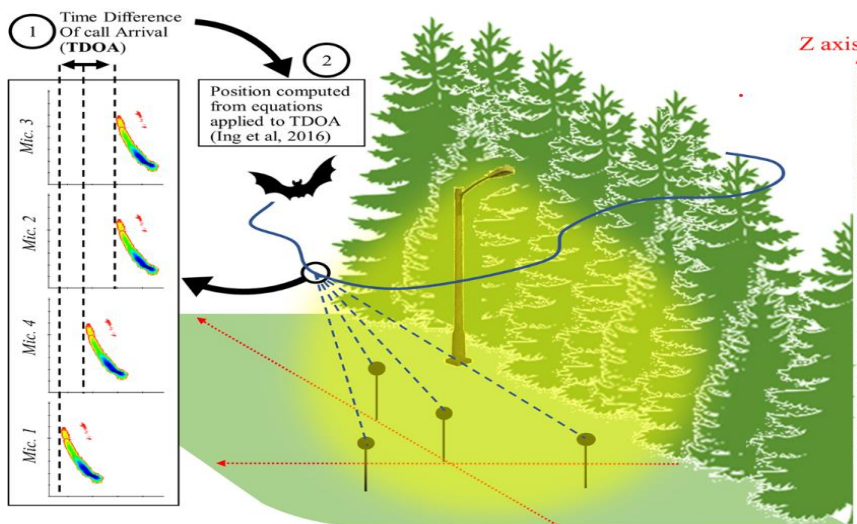
## ■ Possibilité de thèse :

Oui

## ■ Contact :

Thomas Marchais, Cédric Carasco, Bertrand Pérot, Geoffrey Varignier  
[thomas.marchais@cea.fr](mailto:thomas.marchais@cea.fr)  
[cedric.carasco@cea.fr](mailto:cedric.carasco@cea.fr)  
[bertrand.perot@cea.fr](mailto:bertrand.perot@cea.fr)  
[varignier.geoffrey@gmail.com](mailto:varignier.geoffrey@gmail.com)





# Étude des interactions compétitives chez les chiroptères par trajectographie acoustique 3D et leur modification sous pression anthropique : cas de la pollution lumineuse

DTN/SMTA/LMTE

Dans le champ de la biologie de la conservation étudiant l'impact des activités humaines sur les chiroptères, les métriques fonctionnelles et comportementales peuvent manquer pour décrire les mécanismes des réponses observées, et dont la compréhension est pourtant essentielle à la production de recommandations opérationnelles. Lorsque la disponibilité spatio-temporelle de la ressource alimentaire est modifiée par les activités humaines, la plupart des études se concentrent sur les réponses des espèces du point de vue de leur abondance ou de la composition des communautés, mais cette image reste partielle et ne permet pas de révéler des changements plus discrets tels que la diminution du succès d'alimentation par modification des équilibres de compétition/facilitation entre individus. Les chiroptères insectivores constituent un modèle très étudié situé en sommet de chaîne alimentaire, et particulièrement pertinent pour étudier les interactions comportementales interindividuelles. En effet, leur caractère extrêmement mobile et social, la diversité de leurs stratégies de vol en chasse, et leur usage subtile de l'écholocation pouvant être suivie de façon automatisée grâce aux technologies récentes, en fait un modèle d'exception pour approfondir des concepts d'écologie comportementale et identifier des mécanismes à l'origine des conséquences des forçages anthropiques sur la biodiversité.

## # Objectif du stage

L'objectif sera d'étudier la variation du succès de capture de proies chez les chiroptères insectivores, et des stratégies de vol sous-jacentes, en lien avec la densité de congénères présents simultanément (compétition par exploitation, par exemple par densité-dépendance) et leur comportement d'écholocation (compétition par interférence, par exemple par modification des caractéristiques des cris pour gêner les congénères). Il s'agira également d'identifier les couples d'espèces les plus soumises aux situations de compétition, afin d'en comprendre les causes (par exemple est-ce que certains traits d'histoire de vie expliquent le niveau de compétitivité des espèces). Une fois ces bases théoriques posées, dans la continuité de travaux en cours au CESCO, le second objectif consistera à appliquer ces concepts à un cas pratique de modification des équilibres naturels d'origine anthropique. Le cas sera celui de la pollution lumineuse, et permettra de poser des hypothèses claires quant au réarrangement spatio-temporel de la ressource alimentaire (la plupart des proies arthropodes des chiroptères étant attirées et concentrées sous les sources lumineuses) et ses conséquences sur les équilibres de compétition chez les chiroptères.

## # Démarche expérimentale

La première partie du stage visant à poser les bases théoriques des équilibres de compétition reposera sur un jeu de données récolté durant l'été 2024 sur des habitats hautement favorables aux interactions interindividuelles, sur un total de 31 sites. Des réseaux de microphones synchronisés ont été utilisés pour reconstruire en 3D à partir des cris d'écholocation chaque position et trajectoire de chiroptère, pour un total de plus d'un million de positions. L'identité des espèces, la probabilité de chasse,

les différentes caractéristiques des cris (intensité, durée, fréquence...), la discrimination des individus volant en simultané, sont extraits en utilisant des outils de machine learning et routines R développés au laboratoire dans le cadre programmes tels que Vigie-chiro.

La seconde partie du stage visera à appliquer les concepts précédemment établis sur le cas d'étude de la pollution lumineuse et consistera en une expérimentation *in natura* démarrant à la moitié du stage en utilisant la même méthode de trajectographie. Cette expérimentation pourra prendre la forme d'un protocole de type pair-design incluant l'échantillonnage simultané des trajectoires de chiroptères sur des sites éclairés (traitement) et non éclairés (contrôles), avec idéalement 2 paires par nuit (4 sites), et ce durant 5 à 10 nuits.

## # Rôle du stagiaire dans le déroulement du projet

Le/la stagiaire réalisera un état de l'art de la littérature scientifique disponible sur le sujet, construira le protocole expérimental et le mettra en œuvre en binôme avec les maîtres de stage, préparera les données (l'ensemble du workflow est déjà développé, seules des améliorations en marge seront à prévoir), réalisera les analyses statistiques après avoir été formé(e), puis écrira son mémoire de stage. Les analyses et interprétations seront menées avec l'accompagnement des maîtres de stage, et la rédaction d'un article scientifique sera engagée selon les aptitudes, motivations et projets de carrière du stagiaire.

## ■ Formation souhaitée :

Master 2

Bonne maîtrise des méthodes d'analyses statistiques / Biologie des chiroptères

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Maîtrise de la préparation, manipulation, et analyses des données sous R

## ■ Mots clés :

Chiroptères, Trajectographie, pollution lumineuse

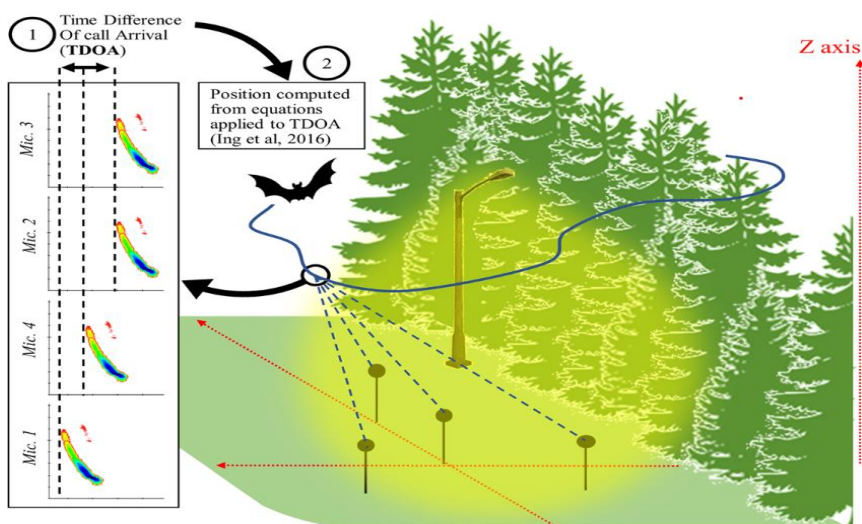
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

Benoit Charrasse (CEA, LMTE) & Kevin Barré (CESCO, UMR7204, MNHN)

[Benoit.CHARRASSE@cea.fr](mailto:Benoit.CHARRASSE@cea.fr) ; [kevin.barre@mnhn.fr](mailto:kevin.barre@mnhn.fr)



# Study of competitive interactions in chiropterans using 3D acoustic trajectography and their modification under anthropic pressure: the case of light pollution

DTN/SMTA/LMTE

In the field of conservation biology studying the impact of human activities on chiropterans, functional and behavioural metrics may be lacking to describe the mechanisms of the responses observed, and yet understanding these is essential for producing operational recommendations. When the spatio-temporal availability of food resources is modified by human activities, most studies focus on the responses of species in terms of their abundance or community composition, but this picture remains partial and does not reveal more discrete changes such as a reduction in feeding success due to changes in the balance of competition/facilitation between individuals. Insectivorous chiropterans are a much-studied model at the top of the food chain, and are particularly relevant for studying inter-individual behavioural interactions. Their extremely mobile and social nature, the diversity of their hunting flight strategies and their subtle use of echolocation, which can be tracked automatically using recent technologies, make them an exceptional model for exploring behavioural ecology concepts and identifying the mechanisms behind the consequences of anthropogenic forcing on biodiversity. Translated with DeepL.com (free version)

## # Aim

The aim will be to study the variation in prey capture success in insectivorous chiropterans, and the underlying flight strategies, in relation to the density of conspecifics present at the same time (competition by exploitation, for example by density-dependence) and their echolocation behaviour (competition by interference, for example by modifying the characteristics of the calls to disturb conspecifics). The aim will also be to identify the pairs of species most subject to competition, in order to understand the causes (for example, do certain life-history traits explain the level of competitiveness of the species). Once these theoretical foundations have been laid, following on from the work in progress at CESCO, the second objective will be to apply these concepts to a practical case of anthropogenic modification of natural balances. The case will be that of light pollution, and will enable clear hypotheses to be put forward as to the spatio-temporal rearrangement of the food resource (most of the arthropod prey of chiropterans being attracted and concentrated under light sources) and its consequences on the competitive equilibrium in chiropterans.

## # Experimental approach

The first part of the project, aimed at laying the theoretical foundations of competitive equilibria, will be based on a dataset collected during the summer of 2024 at a total of 31 sites in habitats that are highly favourable to inter-individual interactions. Synchronised microphone arrays were used to reconstruct each chiropteran position and trajectory in 3D from echolocation calls, for a total of more than

one million positions. The identity of the species, the probability of hunting, the various characteristics of the calls (intensity, duration, frequency, etc.) and the discrimination of individuals flying simultaneously were extracted using machine learning tools and R routines developed in the laboratory as part of programmes such as Vigie-chiro. The second part of the course will be aimed at applying the previously established concepts to the case study of light pollution and will consist of an in natura experiment starting halfway through the course, using the same trajectography method. This experimentation could take the form of a pair-design type protocol including simultaneous sampling of chiropteran trajectories on lit sites (treatment) and unlit sites (controls), with ideally 2 pairs per night (4 sites), for 5 to 10 nights.

## # Role of the trainee in the project

The trainee will carry out a state-of-the-art review of the scientific literature available on the subject, design the experimental protocol and implement it in tandem with supervisors, prepare the data (the entire workflow has already been developed, only marginal improvements will be required), carry out the statistical analyses after being trained, and then write his/her course dissertation. The analyses and interpretations will be carried out with the support of the internship supervisors, and the writing of a scientific article will be undertaken depending on the intern's aptitudes, motivations and career plans.

## ■ Formation souhaitée :

Good practice in statistical analysis methods / Chiroptera biology

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

Proficiency in preparing, manipulating and analysing data in R

## ■ Mots clés :

Chiropterans, Trajectography, light pollution

## ■ Possibilité de thèse :

No

## ■ Contact :

Benoit Charrasse (CEA, LMTE) & Kevin Barré (CESCO, UMR7204, MNHN)

[Benoit.CHARRASSE@cea.fr](mailto:Benoit.CHARRASSE@cea.fr) ; [kevin.barre@mnhn.fr](mailto:kevin.barre@mnhn.fr)



# Tests de protocoles d'inventaires des orthoptères, Evaluation de leur complémentarité

DTN/SMTA/LMTE

**Le site du CEA de Cadarache comporte de vastes zones d'habitats naturels, dont des habitats de milieux ouverts, dans lesquels on retrouve de nombreuses espèces d'orthoptères à enjeux de conservation. Ces espèces peuvent être impactées par des projets (créations d'installations, ...), ainsi que par les modes de gestion des espaces aux abords des installations. Le stage se propose de tester des protocoles d'inventaires des orthoptères, d'évaluer leur complémentarité, et de faire des propositions pour un suivi plus long terme ultérieur.**

## 1. Synthèse bibliographique

- Protocoles d'inventaires et interprétations.
- Choix de variables à relever sur les placettes d'inventaires.

## 2. Choix de placettes d'inventaires

- Sélection de placettes avec des contextes écologiques différents (géologie, habitats, végétation, modes de gestion, ...).
- Nombre à adapter en fonction du temps disponible. Prévoir au moins 3 passages à des dates différentes par placettes.

## 3. Description des placettes et des sessions d'inventaires

- Définition de variables environnementales / climatiques, et de leur(s) méthode(s) de relevé.
- Objectifs : chercher des variables potentiellement explicatives des résultats sur les différentes placettes, certaines d'entre elles pouvant être liées aux méthodes de gestion (pour pouvoir à terme évaluer un effet de changements de pratiques).
- Liste non exhaustive : pente, exposition, météo, végétation, taux de recouvrement par strates, % de sol nu,...

## 4. Mise en œuvre des protocoles d'inventaires sur les placettes

- Chron'orthoptères
- Indice Linéaire d'Abondance (ILA)
- Quadrats botaniques

## 5. Tests de méthodes plus automatisées (moins dépendantes de l'observateur)

- Pièges photos de jour

- Enregistrements acoustiques (ultrasons et audibles)
- Tests sur les placettes où sont mis en œuvre les protocoles d'inventaires. Aux mêmes dates si possible pour comparaison des résultats.

## 6. Interprétations

- Protocoles
- Pièges photos
- Enregistrements (Tadarida pour les ultrasons, annotations de sons dans l'audible)
- Comparaisons : types de résultats (nombre d'espèces, richesse spécifique, abondance...)
- Evaluation de la complémentarité des méthodes (détection d'espèces, effet observateur, ...)
- Définition d'indicateurs.

## 7. Propositions pour un suivi ultérieur

- Protocoles + autres méthodes
- « Toutes espèces » ou seulement certaines ciblées ou se restreindre à certains groupes : pour réduire le temps à passer sur le terrain et l'effet observateur, pour favoriser la reproductibilité, espèces plus présentes et « complémentaires » des points de vue de leurs spécificités (généralistes, spécialistes) et du calendrier phénologique (dates, phases, ...)

## ■ Formation souhaitée :

Licence 3 en écologie

## ■ Durée du stage :

4 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

R studio, Python, Tadarida

## ■ Mots clés :

Orthoptères, protocoles, acoustique, pièges photos

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

COURTOIS Nathalie  
nathalie.courtois@cea.fr





## Tests of orthopteran survey protocols, evaluation of their complementarity

The CEA Cadarache site includes vast areas of natural habitats, including open habitats, which are home to many orthopteran species of conservation concern. These species may be impacted by projects (creation of facilities, etc.), as well as by the way in which the areas around the facilities are managed. The aim of the internship is to test orthopteran inventory protocols, assess their complementarity and make proposals for future longer-term monitoring.

### 1. Bibliographical synthesis

- Inventory protocols and interpretations
- Choice of variables to be recorded on survey plots.

### 2. Choice of survey plots

- Selection of plots with different ecological contexts (geology, habitats, vegetation, management methods, etc.).
- Number to be adapted according to the time available. Plan at least 3 visits on different dates per plot.

### 3. Description of plots and survey sessions

- Definition of environmental/climatic variables and their survey method(s). Objectives: to look for variables that could potentially explain the results on the different plots, some of which could be linked to management methods (to be able to assess the effect of changes in practices in the long term).
- Non-exhaustive list: slope, exposure, weather, vegetation, cover rate by strata, % bare soil, etc.

### 4. Implementation of inventory protocols on plots

- Chron'orthoptères
- Linear Abundance Index (LAI)
- Botanical quadrats

### 5. Testing of more automated

### methods (less dependent on the observer)

- Daytime photo traps
- Acoustic recordings (ultrasound and audible)
- Tests on the plots where the inventory protocols are implemented. On the same dates if possible to compare results.

### 6. Interpretations

- Protocols.
- Photo traps.
- Recordings (Tadarida for ultrasound, annotations of audible sounds).
- Comparisons: types of results (number of species, species richness, abundance, etc.).
- Evaluation of the complementarity of methods (species detection, observer effect, etc.).
- Definition of indicators.

### 7. Suggestions for future monitoring

- Protocols + other methods
- 'All species' or only certain targeted species or restrict to certain groups: to reduce the time spent in the field and the observer effect, to encourage reproducibility, more present and "complementary" species in terms of their specific characteristics (generalists, specialists) and the phenological calendar (dates, phases, etc.).

#### ■ Formation souhaitée :

Licence 3 in ecology

#### ■ Durée du stage :

4 months

#### ■ Méthode/logiciel(s):

R studio, Python, Tadarida

#### ■ Mots clés :

Orthopterans, protocols, acoustics, photo traps

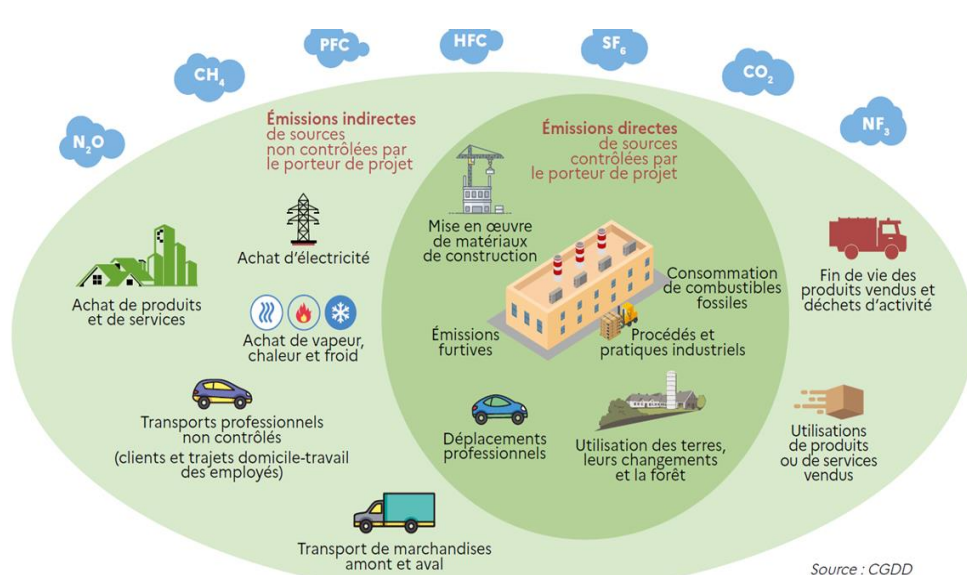
#### ■ Possibilité de thèse :

No

#### ■ Contact :

COURTOIS Nathalie  
nathalie.courtois@cea.fr





## Quantification des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact

DTN/SMTA/LMTE

Source : CGDD

**Au regard des engagements de la France en matière de lutte contre le changement climatique, l'incidence des projets sur le climat nécessite d'être traitée à sa juste valeur dans les études d'impact. Au-delà d'une obligation réglementaire, il s'agit bien de concevoir des projets qui s'inscrivent dans le respect des orientations et de la trajectoire de réduction des émissions de GES définies par la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC).**

Le Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement (LMTE) est en charge de la rédaction des études d'impact pour les projets et installations de la Direction des Energies (DES) du CEA.

La prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les EI passe par la réalisation d'un bilan carbone sur toute la durée du projet considéré avec l'outil Bilan Carbone® et la définition des actions de réduction ou de compensation carbone associées.

Le sujet de stage porte sur :

- l'amélioration des tableurs utilisés par le LMTE :
  - Prise en main de la version V8.10.3 (ou version en vigueur) de l'outil Bilan Carbone®
  - Intégration des facteurs d'émission spécifiques au CEA (déchets radioactifs, achats, déchets conventionnels, engin de chantier...) sur la base des tableurs actuellement utilisés au LMTE

- L'utilisation des nouveaux tableurs pour la réalisation du bilan carbone d'une activité (cycle de l'eau par exemple) ou d'un projet du CEA à définir.

Par ailleurs, le stagiaire devra réaliser une synthèse bibliographique sur la compensation carbone et identifier ainsi les leviers disponibles aujourd'hui en France pour compenser les émissions de GES.

Une bonne maîtrise d'Excel est un plus pour ce stage.

- Formation souhaitée :

Master2 Environnement, risques

- Durée du stage :

4-6 mois

- Méthode/logiciel(s):

Excel

- Mots clés :

Bilan carbone, GES

- Possibilité de thèse :

non

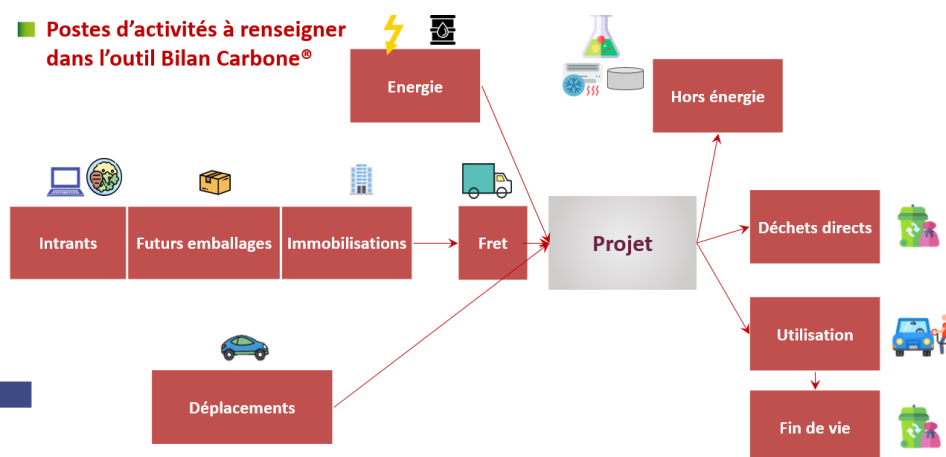
- Contact :

KATEB Lyliia

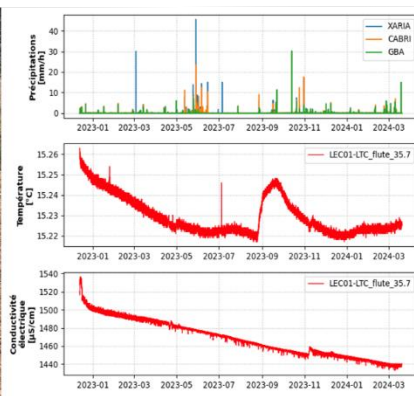
Lyliia.kateb@cea.fr



### Postes d'activités à renseigner dans l'outil Bilan Carbone®







Analyse corrélatoire et spectrale de données de température et de conductivité électrique en forage en vue d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère crétacé sur le site CEA de Cadarache.

DTN/SMTA/LMTE

## Stage de Master 2 – Hydrogéologie – 6 mois

### Laboratoire de Modélisation des Transferts dans le Environnement

### Site CEA de Cadarache – Saint Paul lez Durance (13)

L'objectif des travaux réalisés dans la cadre de ce stage vise à améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère crétacé ainsi que son hétérogénéité (spatiale et en profondeur) à l'échelle du site du CEA Cadarache. Ces travaux seront réalisés au sein du Laboratoire de Modélisation des transferts de l'Environnement sur le site CEA de Cadarache (13), qui compte 19 ingénieurs chercheurs dont 5 dans le domaine de l'hydrogéologie.

Ce sujet de stage s'articulera autour des missions suivantes :

- Appropriation/compréhension du contexte géologique et hydrogéologique du bassin de Cadarache,
- Participation et organisation d'une campagne de récupération de capteurs LTC (pression, conductivité, pression) sur 30 piézomètres environ
- Récupération et traitement des données de conductivité électrique sur une période de 3-4 ans environ
- Analyses corrélatoires et spectrales des données de conductivité électrique et de température.
- Interprétation des résultats obtenus à partir des données géologique disponibles sur les piézomètres suivi (logs, inspections télévisuelles, tests

hydrauliques...)

Ce sujet impliquera également un reporting des actions réalisées sous forme de compte-rendu et de petites présentations visant à exposer les résultats obtenus auprès de l'ensemble de l'équipe. Ces supports serviront également à la rédaction du mémoire de fin de stage.

#### ■ Formation souhaitée :

Master 2 en hydrogéologie / gestion de la ressource en eau

#### ■ Durée du stage :

6 mois

#### ■ Méthode/logiciel(s):

Python

Bureautique

#### ■ Mots clés :

hydrogéologie, analyse corrélatoire, analyse spectrale, conductivité électrique, T°C

#### ■ Possibilité de thèse :

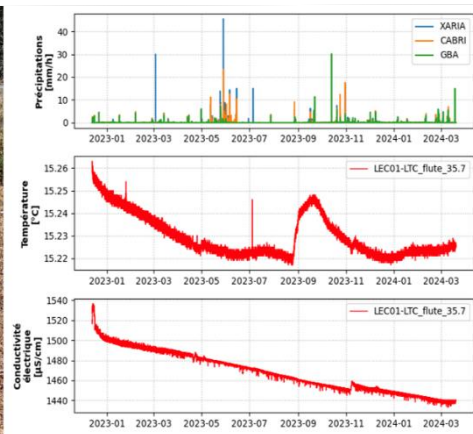
Probable

#### ■ Contact :

MORILHAT Sébastien

Sebastien.morilhat@cea.fr





Correlative and spectral analysis of temperature and electrical conductivity data from drilling to improving knowledge of the hydrodynamic functioning of the Cretaceous aquifer on the CEA Cadarache site.

DTN/SMTA/LMTE

## Master 2 – Hydrogeology – 6 months

### Environmental Transfer Modeling Laboratory

### Cadarache CEA site – Saint Paul lez Durance (13)

The goal of this work is to improve knowledge of the hydrodynamic functioning of the Cretaceous aquifer as well as its heterogeneity (spatial and in depth) on the scale of the CEA Cadarache site. This work will be carried out within the Environmental Transfer Modeling Laboratory on the CEA Cadarache site (13), which has 19 research engineers including 5 in the field of hydrogeology.

This internship subject will revolve around the following missions:

- Appropriation/understanding of the geological and hydrogeological context of the Cadarache basin,
- Participation and organization of a campaign to recover LTC sensors (pressure, conductivity, pressure) on approximately 30 piezometers
- Recovery and processing of electrical conductivity data over a period of approximately 3-4 years
- Correlative and spectral analyzes of electrical conductivity and temperature data.
- Interpretation of the results obtained from the geological data available on the monitored piezometers (logs, television inspections, hydraulic tests, etc.)

This subject will also involve reporting on the actions carried out in

the form of reports and small presentations aimed at presenting the results obtained to the entire team. These materials will also be used to write the end of internship dissertation.

#### ■ Formation souhaitée :

Master 2 – Hydrogeology

#### ■ Durée du stage :

6 month

#### ■ Méthode/logiciel(s):

Python

Office software

#### ■ Mots clés :

hydrogeology, correlative analysis, spectral analysis, electrical conductivity

#### ■ Possibilité de thèse :

Yes

#### ■ Contact :

Sébastien MORILHAT

sebastien.morilhat@cea.fr



# Etude des capacités d'infiltration et de ruissellement des sols pour l'établissement d'un bilan hydrique spatialisé

DTN/SMTA/LMTE

**Afin d'évaluer l'impact du fonctionnement de ses installations, le CEA se doit de disposer de méthodes et d'outils opérationnels pour mesurer, contrôler et prédire le devenir d'éventuels rejets dans les sols et les nappes phréatiques, et maîtriser le risque inondation en cas de pluies extrêmes. Le sujet proposé s'inscrit dans ce cadre général, en ciblant plus spécifiquement la zone non saturée (ZNS).**

Le stage sera mené en appui à une thèse qui débute et dont l'objectif principal est de spatialiser le bilan hydrique, en incluant à la fois l'infiltration et le ruissellement, à l'échelle d'un sous-bassin versant du Ravin de la Bête, ruisseau temporaire qui traverse le site de Cadarache et recueille ses eaux de ruissellement avant de se jeter dans la Durance.

Les principaux objectifs du stage sont décrits ci-après :

- Mesures de conductivité hydraulique  $K_s$  à l'infiltromètre à disque et à l'infiltromètre à charge constante Porcher, à différentes profondeurs (en surface et sous la zone racinaire).
- Analyses statistiques et corrélatrices entre les valeurs de  $K_s$  et les caractéristiques physico-chimiques des sols (texture, porosité,...).
- Recherche de critères de spatialisation des valeurs de conductivités hydrauliques (géologie, occupation du sol), par analyses statistiques et géostatistiques.
- Calcul de refus d'infiltration par le modèle de Green & Ampt pour différents épisodes de pluie significatifs réels et en utilisant les données de conductivités

hydrauliques de surface  $K_s$  pour avoir des ordres de grandeurs du potentiel de ruissellement.

- Bilan des données de débit disponibles sur le Ravin de la Bête.
- Analyser si les épisodes de pluie conduisant à un refus d'infiltration correspondent à des débits enregistrés au niveau du Ravin de la Bête.
- Analyses des données de débit (hydrogrammes,...) pour évaluer le(s) type(s) de ruissellement (hortonien, zones contributives).
- Appui du doctorant pour les choix expérimentaux (sous-bassin versant, ...) et les différents dimensionnements (mesures de teneur en eau, mesure de débit, parcelle expérimentale avec mesure du ruissellement,...).

## ■ Formation souhaitée :

Master 2 en Hydrogéologie, Hydrologie, Géosciences

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

R studio, Python Analyses statistiques

## ■ Mots clés :

Hydrogéologie, Hydrologie, Bilan hydrique, Infiltration, Ruissellement

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

COURTOIS Nathalie  
nathalie.courtois@cea.fr





# Hydrogeology, Hydrology, Water balance, Infiltration, Runoff

DTN/SMTA/LMTE

**In order to assess the impact of the operation of its facilities, the CEA needs operational methods and tools to measure, monitor and predict the fate of any discharges into the soil and groundwater, and to control the risk of flooding in the event of extreme rainfall. The proposed subject falls within this general framework, with a more specific focus on the unsaturated zone (UZ).**

The internship will be carried out in support of a thesis that is just starting and whose main objective is to spatialise the water balance, including both infiltration and runoff, at the scale of a sub-catchment area of the Ravin de la Bête, a temporary stream that crosses the Cadarache site and collects its runoff before flowing into the Durance. The main objectives of the course are described below:

- Measurements of hydraulic conductivity  $K_s$  using a disc infiltrometer and a Porcher constant load infiltrometer, at different depths (on the surface and under the root zone).
- Statistical and correlative analyses between  $K_s$  values and the physico-chemical characteristics of the soil (texture, porosity, etc.).
- Research into criteria for spatialising hydraulic conductivity values (geology, land use), using statistical and geostatistical analyses.
- Calculation of infiltration refusals using the Green & Ampt model for various significant real rainfall events and using surface hydraulic conductivity  $K_s$  data to obtain orders of magnitude of runoff potential.
- Review of flow data available on the Ravin de la Bête.
- Analyse whether rainfall events leading to a refusal of infiltration correspond to flows recorded in the Ravin de la Bête.
- Analysing flow data (hydrographs, etc.) to assess the type(s) of runoff (Hortonian, contributing zones).
- Support for the PhD student in making experimental choices (sub-catchment, etc.) and various dimensioning decisions (water content measurements, flow measurement, experimental plot with runoff measurement, etc.).

## ■ Formation souhaitée :

Master 2 in Hydrogeology, Hydrology and Geosciences

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

R studio, Python, Statistical analyses

## ■ Mots clés :

Hydrogeology, Hydrology, Water balance, Infiltration, Runoff

## ■ Possibilité de thèse :

No

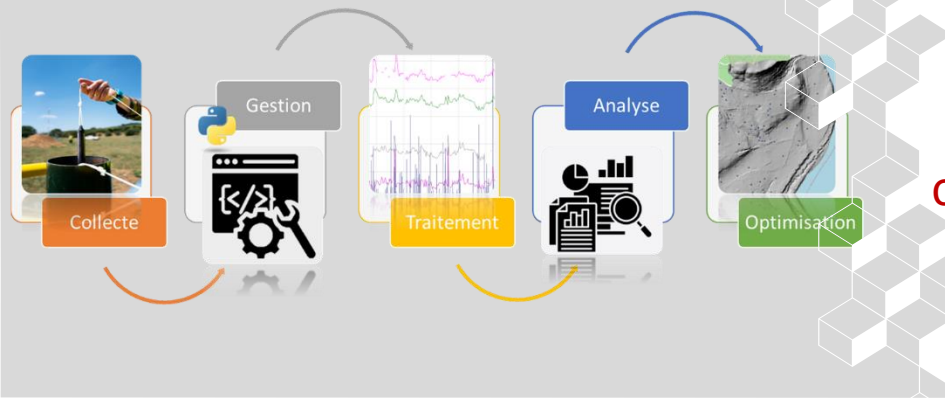
## ■ Contact :

COURTOIS Nathalie  
nathalie.courtois@cea.fr



# Intégration automatique et analyse des données piézométriques pour l'optimisation du suivi en continu de la nappe alluviale du site de Marcoule

DTN/SMTA/LMTE



**L'acquisition de données piézométriques en continu est une étape essentielle dans la compréhension des systèmes hydrogéologiques et pour la surveillance des eaux souterraines. Toutefois, la simple collecte des données n'est pas suffisante, l'enjeu majeur réside dans leur gestion, leur traitement et leur analyse, pour ensuite optimiser au mieux le réseau de suivi.**

Le Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement (LMTE) est l'unité de référence en hydrogéologie pour les installations de la Direction des énergies du CEA.

Dans le cadre de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la nappe alluviale présente sur le site de Marcoule et de la prévention des risques externes notamment (risque inondation, risque de transfert de substances en nappe), un suivi des niveaux de nappe est mis en œuvre via des mesures ponctuelles manuelles et un suivi en continu (sondes de pression) au sein de nombreux piézomètres répartis sur le site et en bordure.

Ces données ont pour objectif de permettre la reconstitution des chroniques piézométriques afin de déterminer spatialement la réactivité de la nappe aux précipitations et autres phénomènes, et de définir les directions et vitesses d'écoulement.

Pour intercomparer les niveaux et dynamiques de la nappe au droit de différents piézomètres, un traitement préalable des données enregistrées par les sondes de pression est indispensable, ceci afin de recalibrer les données de variations de niveaux brutes à partir de mesures manuelles plus robustes (correction d'une dérive éventuelle de sonde) et de considérer les événements extérieurs (anthropiques ou naturels) ayant pu influencer la piézométrie.

Le LMTE utilise un outil spécifique

pour le traitement de ces chroniques, nécessitant au préalable une manipulation des informations relevées mensuellement ou trimestriellement sur le terrain.

Les objectifs du stage sont :

- de développer des outils en Python permettant d'automatiser la gestion des mesures de niveaux dans les différents fichiers de configuration de l'outil de traitement du LMTE, ainsi que dans les fichiers Excel de compilation des données manuelles pour les piézomètres non équipés de sondes ;
- d'analyser les chroniques piézométriques disponibles afin d'identifier et définir des secteurs du site caractérisés par des comportements hydrogéologiques distincts ;
- de faire des propositions d'optimisation du réseau de suivi actuel, tel que la suppression de sondes redondantes ou l'ajout de point manquants.

## ■ Formation souhaitée :

Master 2 en hydrogéologie

Connaissances et/ou intérêt pour la programmation en Python

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

Pack office, Python

## ■ Mots clés :

Hydrogéologie, programmation python, analyse, optimisation

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

GIBERT Emilie / TRINCAL Julien

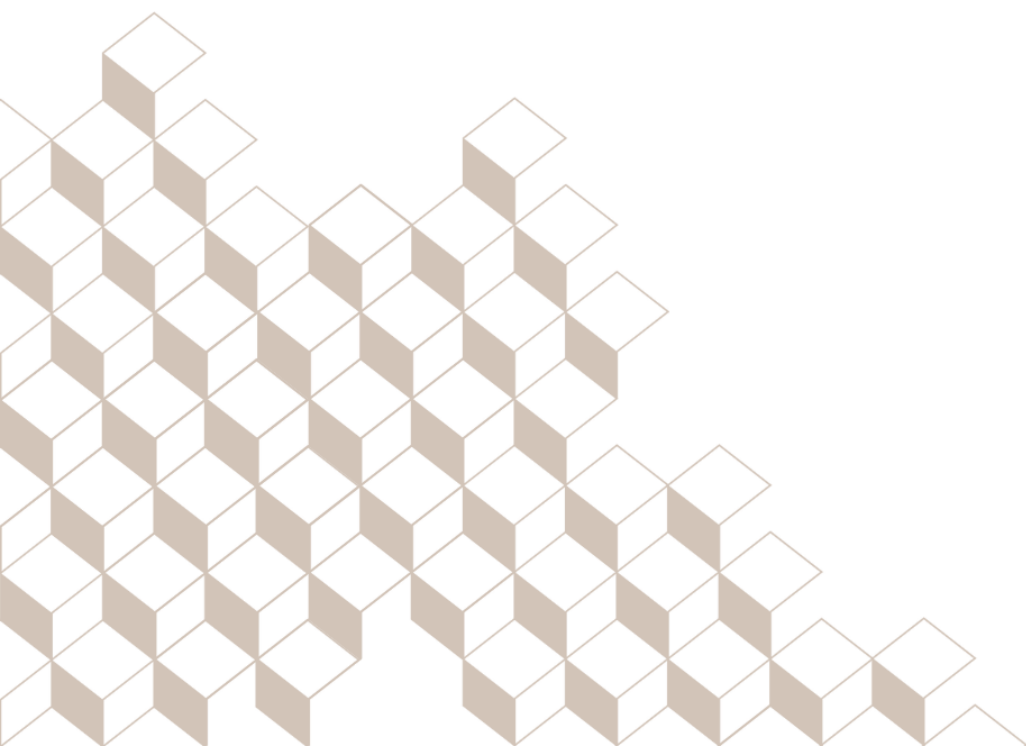
[emilie.gibert@cea.fr](mailto:emilie.gibert@cea.fr),  
[julien.trincal@cea.fr](mailto:julien.trincal@cea.fr)

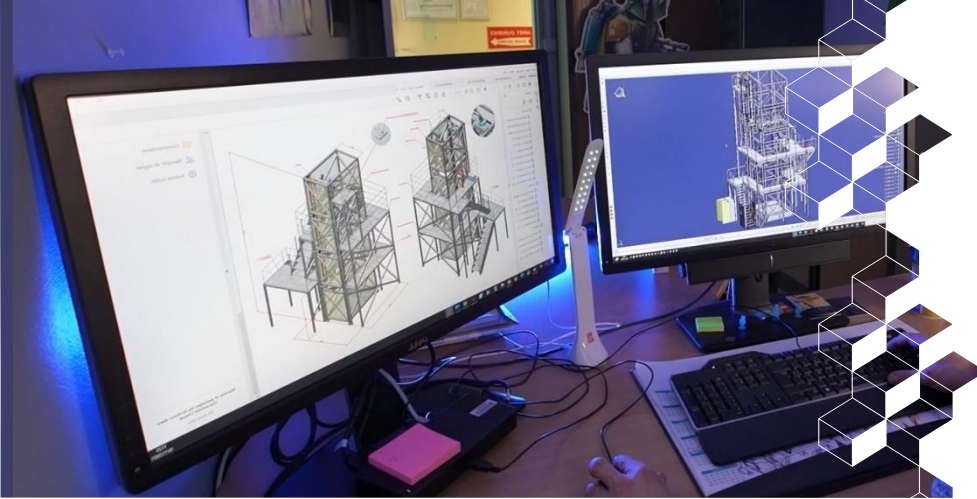


# STCP

Service de  
technologie des  
composants et des  
procédés

*Component Technology and Processes  
unit*





## Conception d'une section d'essais pour soufflet sodium

DTN/STCP/LCIT

**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.**

Dans le cadre des actions de développements des composants innovants pour les réacteurs sodium, un nouveau moyen d'essai de qualification est envisagé.

Ce moyen d'essai, dénommé IVETORNER (Installation de VERification, par application des Torseurs Représentatifs, des Nouveaux Eléments de Raccordement des tuyauteries de type soufflet), sera une veine d'essai connectée hydrauliquement à la boucle DOLMEN ; boucle présente dans l'installation PAPIRUS (ICPE HRT – bât 202).

L'allotissement lié à la réalisation de cette veine d'essai est réalisé comme suit :

- Lot 1 : Charpente & Circuit Na
- Lot 2 : Composant Soufflet

Le stage, dont le but est de concevoir une section d'essais, se déroulera en différentes phases :

I. Prendre en main du sujet sur la base de la documentation mise à disposition ;

II. Concevoir tout ou parties de cette section d'essais à l'aide d'outils CAO disponibles au LCIT ainsi que son système de supportage ;

III. Pré-Dimensionner le système de supportage de la section d'essais ;

IV. Réaliser les plans d'ensembles et de détails de cette section d'essais.

### ■ Formation souhaitée :

Étudiant en 3ème année BUT /  
Licence en conception  
mécanique

### ■ Durée du stage :

3-4 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Solidworks, Catia V5

### ■ Mots clés :

Conception mécanique  
CAO

### ■ Possibilité de thèse :

Non

### ■ Contact :

ELIE Géraud  
gerald.elie@cea.fr





# Etude CFD d'une maquette expérimentale d'échangeur de chaleur

DTN/STCP/LCIT

**Le LCIT conçoit un échangeur de chaleur compact en s'appuyant sur les procédés de fabrication additive. Une maquette d'échangeur permettra de valider expérimentalement les performances thermohydrauliques des motifs d'échange sélectionnés. L'objectif de ce stage est de guider la conception de cette maquette, en s'appuyant sur un approche CFD.**

Le travail proposé est dédié à la famille 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 innovants ont ainsi été identifiées en se basant sur une campagne de calculs CFD. Ces calculs ont permis de caractériser les échanges thermiques convectifs et les pertes de charges de tels motifs. 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), constitue la prochaine étape du programme.

Le stage portera principalement sur le dimensionnement d'un tel dispositif expérimental, et particulièrement de la section d'essais. On se basera sur une approche CFD (avec ANSYS Fluent), ainsi que sur des outils d'analyse Python précédemment développés au sein du laboratoire.

L'objectif principal est de proposer un design pour les collecteurs de l'échangeur, reliant le faisceau d'échange au reste du circuit hydraulique, afin d'obtenir une distribution de l'écoulement en adéquation avec les objectifs expérimentaux. Le design sélectionné devra également prendre en compte les contraintes liées au procédé de fabrication.

En fonction de l'avancement des travaux, d'autres thématiques pourront être couvertes : détermination des débits et températures en cohérence avec les objectifs expérimentaux, réflexions pour l'implantation de la maquette au sein de l'installation, estimation des effets de rugosité par une approche CFD...

## ■ Formation souhaitée :

Étudiant en 2<sup>ème</sup> ou 3<sup>ème</sup> année d'école d'Ingénieur généraliste / mécanique des fluides / thermique

## ■ Durée du stage :

4-6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

ANSYS FLUENT, PYTHON, CATIA V5, Solidworks, bureautique

## ■ Mots clés :

Thermohydraulique, CFD, fabrication additive, expérimentation

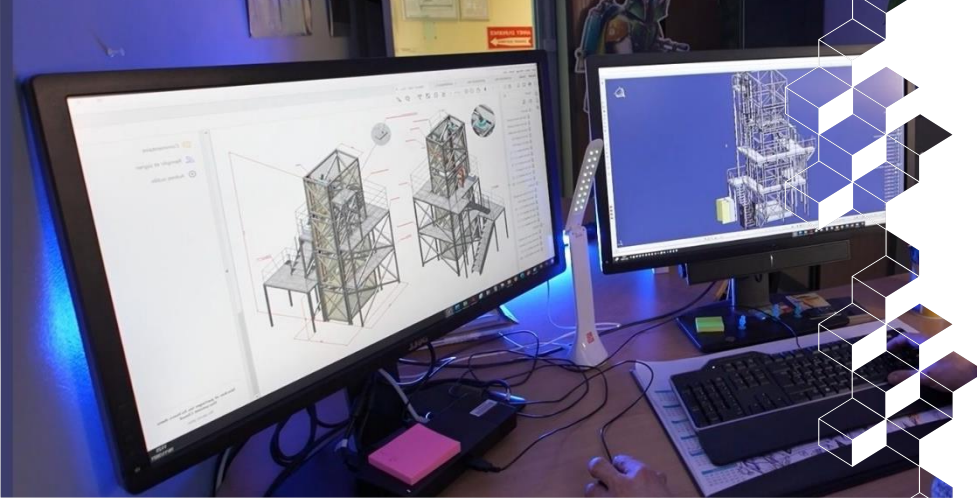
## ■ Possibilité de thèse :

non

## ■ Contact :

RENON Clément  
Clement.renon@cea.fr





# Dimensionnement thermomécanique d'une manchette thermique à haute température pour la conception d'un banc de qualification en fatigue

DTN/STCP/LCIT

**Le CEA a pour mission d'étudier des technologies innovantes, en soutien au parc électrogène français et aux réacteurs futurs. Ce stage de fin d'études s'inscrit dans le cadre du soutien aux start-ups du nucléaire, avec la conception d'une manchette thermique pour un banc de qualification en fatigue et à haute température.**

Les manchettes thermiques sont des éléments de protection utilisés dans les réacteurs nucléaires, en particulier dans le cadre des RNR-Na (réacteur à neutrons rapides, refroidis au sodium). Cette technologie de réacteur est aussi envisagée pour les Advanced Modular Reactors (AMR) 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). En ce qui concerne les manchettes thermiques, elles sont utilisées pour raccorder de façon étanche différents éléments d'un même composant qui sont soumis à des dilations thermiques différentielles. En effet, elles permettent de diminuer les contraintes mécaniques en travaillant sur le profil du gradient thermique appliqué aux structures en régime permanent. Elles peuvent aussi permettre une transition de forme entre des parois minces et des parois épaisses qui auraient des comportements différents lors d'un même transitoire thermique. Les structures sont ainsi protégées des cyclages thermiques (rapides ou lents) pouvant les endommager. En particulier dans le cas de RNR-Na où le caloporteur sodium peut être chauffé à plus de 550°C, la manchette thermique est une technologie intéressante pour s'assurer de la tenue mécanique des dispositifs, en limitant le risque d'endommagement dû à des dilatations différentielles.

Pour venir en soutien aux start-ups à technologie sodium, le LCIT est chargé de créer un banc de fatigue qui permettra de qualifier des composants innovants (soufflet) dans un environnement sodium, et l'utilisation d'une manchette thermique est devenue nécessaire. Dans ce cadre, une première conception de manchette thermique a été réalisée.

L'objectif du stage est d'optimiser la conception mécanique de cette manchette thermique. Il faudra pour cela améliorer la conception existante en réalisant une étude paramétrique sur la géométrie. Cette étude s'appuiera sur un modèle éléments finis 2D alliant thermique et mécanique sous ANSYS Workbench. La tenue mécanique de la manchette thermique devra donc être vérifiée, en s'appuyant sur les critères de dimensionnement applicables pour les réacteurs de IVe génération (code RCC-MRx). Une fois la conception établie, un modèle 3D pourra ensuite être étudié pour compléter le dimensionnement et réduire la taille de la manchette. Il sera également possible d'étudier l'influence des transitoires thermiques. Enfin, le stage devra aboutir à des règles de conception pour les manchettes thermiques, afin de guider les conceptions futures.

Les travaux seront menés en lien direct avec l'équipe projet chargée de la conception du banc de qualification, avec des ingénieurs et des experts en thermomécanique du LCIT.

Le stagiaire devra être force de proposition pour guider l'étude en fonction des résultats obtenus. Un solide bagage technique en mécanique et une bonne autonomie sont nécessaires pour mener à bien le stage.

À l'issue du stage, le stagiaire disposera d'une forte expérience en ingénierie mécanique dans le cadre d'un projet de R&D innovant.

## ■ Formation souhaitée :

Troisième année d'école d'ingénieur

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

ANSYS Workbench, Solidworks, RCC-MRx

## ■ Mots clés :

RDM, éléments finis, règles de dimensionnement, conception mécanique, haute température

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

FACHE Simon-Pierre  
Simon-pierre.fache@cea.fr





## Amélioration de l'outil d'analyse fatigue- fluage selon le RCC- MRx

DTN/STCP/LCIT

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.

Le RCC-MRx (code de conception et de construction pour les matériels mécaniques de réacteurs avancés, de fusion, ou expérimentaux) est un élément central du laboratoire LCIT, qui réalise la conception de dispositifs avec ce code, et participe également à son amélioration, sur certains thèmes très complexes : prise en compte de fragilisation des matériaux (vieillessement, irradiation), flambage, déformation progressive, fatigue-fluage.

La fatigue-fluage est un dommage apparaissant à haute température. Elle se caractérise par l'amorçage de fissures, qui peuvent se propager ensuite et mener à une fuite ou rupture de l'équipement. Tout chargement qui varie cycliquement est susceptible d'engendrer des variations de contraintes et un dommage de fatigue-fluage si l'équipement est maintenu pendant de longues durées dans le domaine du fluage significatif.

Le RCC-MRx propose des règles pour se prémunir de ce dommage. Ces règles ont été introduites dans un outil développé au LCIT en VBA; l'outil est utilisé pour faire des analyses rapidement, comparer les évolutions de règles, tester l'influence d'un paramètre.

Cependant, le code RCC-MRx est en constante évolution et cet outil a besoin d'être amélioré sur différents points :

- coefficient de joint soudé;
- possibilité d'une analyse moyenne (par suppression des marges du design)
- introduction de feuilles matériaux manquantes, réorganisation des feuilles matériaux pour un meilleur maintien de l'outil
- introduction d'une nouvelle règle spécifique aux aciers qui déconsolident cycliquement
- tests de non régression (comparaison des résultats d'analyses à des références)

### ■ Formation souhaitée :

Mécanique et matériaux

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

VBA

### ■ Mots clés :

RCC-MRx, fatigue-fluage

### ■ Possibilité de thèse :

### ■ Contact :

LEJEAIL Yves

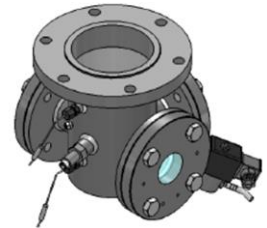
Yves.lejeail@cea.fr





# Étude d'un procédé de lavage innovant utilisant des solutions salines – contribution à la définition des mécanismes réactionnels

DTN/STCP/LESC



**Le sodium est utilisé comme fluide caloporteur dans des installations de production d'énergie, parmi lesquelles les réacteurs nucléaires à neutrons rapides (RNR-Na), les accélérateurs de neutrons ou les centrales solaires à concentration (CSP).**

Compte tenu des températures de fonctionnement de ces installations, toutes les surfaces en contact avec le sodium liquide sont mouillées par du sodium résiduel une fois les circuits vidangés et égouttés : on le retrouve sous forme de films et de rétentions, selon la géométrie des structures. Lors des manutentions ou inspections de composants ou systèmes inhérentes à la vie d'une telle installation, le traitement de ce sodium résiduel est impératif pour assurer la sécurité des interventions. De même, lors du démantèlement de l'installation, l'exutoire final n'acceptant pas de résidus sodés, un traitement doit être mis en œuvre pour éliminer l'intégralité du sodium et de ses dérivés. Des procédés de traitement du sodium ont été développés au CEA depuis les années 1970 (procédé NOAH, carbonatation, hydrolyse et lavage à l'eau). Le procédé de référence pour traiter le sodium résiduel des composants et des assemblages irradiés des RNR-Na est le lavage à l'eau dans un puits de lavage dédié. Ce procédé met en œuvre une réaction du sodium avec l'eau sous différentes formes, en maîtrisant la cinétique de réaction, qui est instantanée et fortement exothermique sans contrôle de la mise en contact des réactifs.

salines pour ralentir la cinétique de réaction sodium-eau. Sur la base des résultats d'une thèse soutenue en 2014 et d'études complémentaires, le stagiaire sera amené à réaliser des essais expérimentaux sur un dispositif petite échelle permettant d'observer finement les phénomènes associés à la réaction (pic de pression, dégagement d'hydrogène, formation de soude, propagation d'ondes de pression...). Les résultats de ce stage permettront d'orienter la suite des études, avec le démarrage d'une thèse prévue en octobre 2024.

Pour ce faire, le stage se déclinera en plusieurs axes :

Partie expérimentale:

- Compréhension du problème, prise en main du dispositif expérimental,
- Étude paramétrique,
- Exploitation des résultats,
- Proposition de voies d'optimisation, perspectives.
- Étude des modifications à apporter au dispositif LAVINO en vue de rédiger un cahier des charges des modifications à réaliser pour établir les cinétiques réactionnelles

Partie théorique :

- étude des électrolytes avec le logiciel PHREEQC

## Travail demandé :

Ce stage se situe dans le contexte de l'étude d'un procédé de lavage innovant utilisant des solutions

## Formation souhaitée :

École d'ingénieur, Bac+5

Génie chimique / génie des procédés

## Durée du stage :

6 mois

## Méthode/logiciel(s):

Expérimentations, modélisation

## Mots clés :

Cinétique chimique, chimie des solutions, lavage innovant

## Possibilité de thèse :

Une thèse est proposée dans la continuité du stage

## Contact :

GICQUEL Leïla

[leila.gicquel@cea.fr](mailto:leila.gicquel@cea.fr)





# Etude numérique des écoulements turbulents dans les sous assemblages de REP

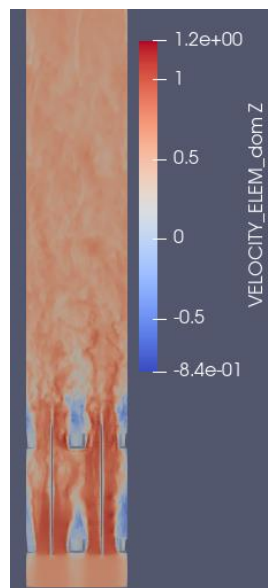
DTN/STCP/LETH

**Les écoulements turbulents dans les sous assemblages de REP permettent de récupérer l'énergie libérée lors de la fission mais induisent des vibrations des crayons. Afin d'améliorer nos connaissances de ces écoulements, le stage a pour but de les simuler au sein d'une maquette représentative d'un sous assemblage de REP.**

Les assemblages combustibles sont des constituants clés du cœur des réacteurs. Ils sont composés de tubes de petit diamètre entre lesquels circule un écoulement fortement turbulent. Ces crayons sont maintenus ensemble par des grilles et d'autres spécificités géométriques peuvent aussi se trouver en pied d'assemblage. Les structures turbulentes de l'écoulement, amplifiées par toutes ces spécificités géométriques, génèrent des vibrations qui peuvent conduire à l'usure par frottement des crayons combustibles.

L'objectif de ce stage est d'étudier numériquement les effets de ces différentes singularités géométriques sur les grandeurs turbulentes, pour comprendre leur rôle dans les phénomènes de frottement crayon-grille. Un exemple de déroulement du stage est donné à titre indicatif :

- Courte bibliographie sur les écoulements turbulents dans les sous assemblages de réacteurs
- préparation du jeu de données (CAO, maillages, configuration du solveur) pour réaliser des simulations CFD
- Post traitement des simulations et validation en comparant à des résultats expérimentaux



*Visualisation de l'écoulement au travers d'une grille de mélange, Simulation effectuée à l'aide de TrioCFD*

Le stage se concentrera sur une étude numérique CFD. Il requiert des bases de mécanique des fluides (écoulements turbulents) et de méthodes numériques ainsi qu'une aisance avec l'anglais (une bonne partie de la littérature intéressante sur la thématique est en langue anglaise). La connaissance préalable du fonctionnement d'un réacteur et en particulier des caractéristiques des écoulements dans les cœurs n'est pas nécessaire.

## ■ Formation souhaitée :

Bac +5 (Master 2 / Ecole d'ingénieurs)

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

TrioCFD / Code SATURNE / SALOME / Paraview / Python

## ■ Mots clés :

CFD / simulation numérique / turbulence / REP

## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

CHARTON Hugues  
hugues.charton2@cea.fr





# Numerical study of turbulent flows in the fuel assemblies of PWR

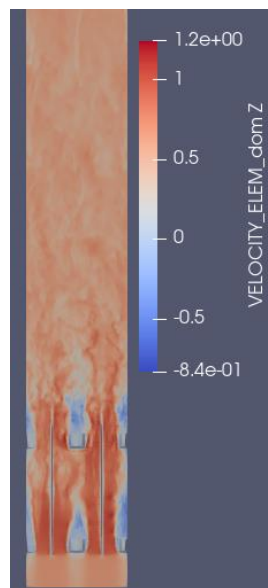
DTN/STCP/LETH

**Turbulent flows in PWR fuel assemblies enable fission energy to be recovered, but induce rod vibrations. The aim of the internship is to simulate these flows in a model facility representative of a PWR sub-assembly in order to improve our knowledge.**

Fuel assemblies are key components of reactor cores. They are made up of small-diameter tubes between which a highly turbulent flow circulates. These rods are held together by grids, and other geometric features may also be found at the bottom of the assembly. Amplified by these features, turbulent structures induce vibrations that can lead to fretting wear damages.

The topic of this internship is to study numerically the effect of the different geometrical features on turbulent flow quantities in order to understand their role in flow induced vibrations. It could include the following activities (non-exhaustive list):

- Brief literature review on turbulent flows in core fuel sub-assemblies
- Data set configuration for CFD calculations (CAD, Meshing, solver settings)
- Analysis of computation results and validation with experimental measurements



*Visualisation of the turbulent flow through a mixing grid with dimples, computed with TrioCFD*

The internship will include mostly CFD numerical studies. It requires understanding of fundamentals of fluid mechanics (turbulent flows) and numerical methods (finite differences, Fourier transform...). Fluency in English is also important (most of relevant literature on the topic is in English). Prior knowledge of turbulent flow in reactor core is not required.

## ■ Formation souhaitée :

Final year of master degree

## ■ Durée du stage :

6 months

## ■ Méthode/logiciel(s):

TrioCFD / Code SATURNE / SALOME / Paraview / Python

## ■ Mots clés :

CFD / numerical simulation / turbulent flows / PWR

## ■ Possibilité de thèse :

No

## ■ Contact :

CHARTON Hugues

Hugues.charton2@cea.fr



# Développement d'un protocole de caractérisation ultrasonore du mortier de colis de déchets

DTN/STCP/LISM

**L'étude menée au cours du stage doit permettre d'établir la faisabilité d'une méthode acoustique de caractérisation non destructive de colis de déchets, afin de vérifier l'épaisseur du mortier d'enrobage (normalement de quelques centimètres d'épaisseur).**

Les colis de déchets de type « 870 L compacté » sont constitués d'un fût en acier dans lequel des objets primaires sont introduits puis compactés. Le colis est ensuite injecté d'un mortier d'enrobage garantissant le confinement des matières radioactives. Le conditionnement de ces colis doit répondre à différents critères de conformité dont une épaisseur de mortier minimum. **L'objectif du stage est de développer une méthode de contrôle de cette épaisseur.**

Le stage sera en interface avec deux laboratoires du CEA Cadarache: le Laboratoire d'Expertises et Caractérisation Destructive et le Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes. Le LECD développe des procédés de caractérisation pour améliorer la connaissance des déchets de faible et moyenne activité à vie courte. Le LISM développe des méthodes et capteurs de mesures en environnements hostiles (fortes pressions, hautes températures, irradiations, métaux liquides...). Ses compétences sont pluridisciplinaires mais l'acoustique et les ultrasons sont un de ses axes majeurs de compétences qui pourront être mis à profit pour ce stage.

Le LISM accueillera le stagiaire au sein de son laboratoire. Après une phase initiale de bibliographie et d'assimilation des travaux précédemment réalisés au CEA, le stagiaire devra définir et valider un protocole expérimental sur des objets de démonstration, de type maquette, composés de plaque d'acier et de mortier préparé au LECD sans activité radiologique. Les mesures seront réalisées au sein du LISM après formation par l'ingénieur en charge de cette étude puis en autonomie encadrée. Elles pourront être effectuées sur du mortier frais et sec. La définition du protocole passera par le test de différents capteurs, différentes configurations de mesures, différentes formes d'ondes émises... ainsi que par une optimisation du traitement des signaux reçus. Le cas échéant, des simulations (sous CIVA ou COMSOL par exemple) pourront être mise à profit en support à la définition de ce protocole de mesure.

Une méthode non destructive permettant une vérification de la conformité des colis de déchets lors de la fabrication de ceux-ci ou sur des colis déjà produits, revêtirait un caractère important pour le CEA.

## ■ Formation souhaitée :

Master 2 Acoustique ou Ingénieur ayant suivi une spécialisation en acoustique (ENSIM, UTC, ECL, ECM, INSA...) – Master 2 ou ingénieur ayant suivi une formation en instrumentation, en matériau ou en physique générale.

4 à 6 mois

CND Ultrasonore – Python – Eventuellement CIVA ou méthode/logiciel(s) : COMSOL

■ Mots clés : Acoustique, ultrasons, mortier, mesures d'épaisseur, CND (Contrôle Non Destructif)

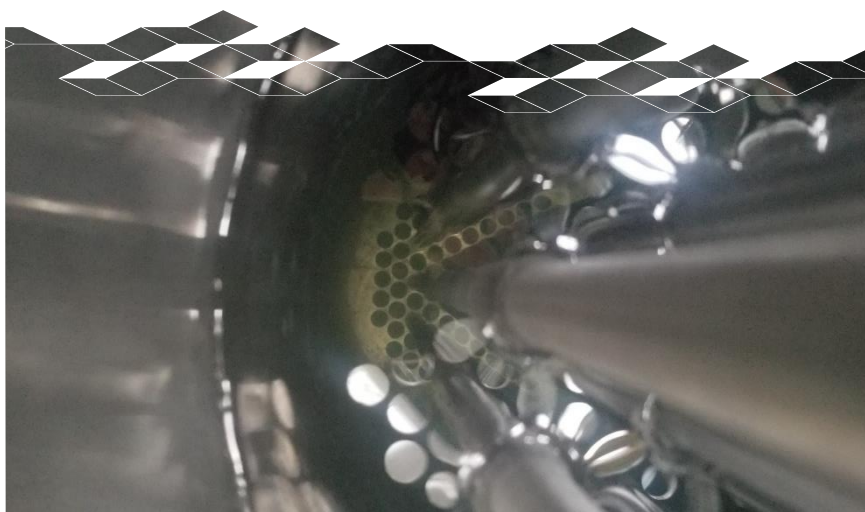
## ■ Possibilité de thèse :

Non

## ■ Contact :

CAVARO Matthieu  
matthieu.cavaro@cea.fr





## Etude du bruit de l'ébullition dans un GV (Générateur de Vapeur)

DTN/STCP/LISM

**Pour améliorer la sûreté d'un potentiel réacteur de génération 4, le CEA souhaite pouvoir détecter le bruit anormal que produirait une fuite dans un générateur de vapeur (GV) multitubulaire en fonctionnement. Dans un tel GV en fonctionnement normal, une partie importante du bruit est lié à l'ébullition de l'eau dans les tubes. Nous voulons donc notamment étudier le bruit que fait l'ébullition de l'eau dans les tubes des GV.**

Nous souhaitons que cette étude soit réalisée dans le cadre d'un stage M2, qui pourra inclure 3 directions.

- Etude de la phénoménologie : Une étude bibliographique devra d'abord être effectuée, ainsi que des analyses dimensionnelles, pour déterminer le type de bruit que cela peut générer (particulièrement le contenu fréquentiel) et les paramètres qui influencent ce bruit. Le stagiaire devra essayer de mettre en place des expériences simples qui permettent de mettre en évidence ces paramètres. Par exemple, pour montrer comment le bruit obtenu à l'extérieur du tube est influencé par le tube lui-même, il suffira d'émettre des signaux acoustiques connus (sweep ou bruit blanc) avec un émetteur dans un tube et d'enregistrer ce qui est entendu à l'extérieur.

- Recherche d'exemples de bruits de GV en fonctionnement : Il est intéressant de rechercher des générateurs de vapeur multitubulaire industriels en fonctionnement sur lesquels ils serait accepté d'effectuer des mesures, pour pouvoir acquérir des enregistrements du bruit qu'ils génèrent.

- Montage d'un démonstrateur de GV. Pour étudier le sujet de la détection de fuite dans un GV, une nouvelle maquette de GV minimaliste (mais cependant volumineuse et

complexe) a été construite au CEA Cadarache. Le stagiaire devra tester cette nouvelle maquette de GV, enregistrer et analyser les bruits produits par cette maquette. Il pourra proposer des modifications pour étudier les paramètres principaux et des améliorations pour la suite.

Le but final est une compréhension des phénomènes qui génèrent le bruit d'ébullition et statuer sur la représentativité de la maquette GV réalisée. La majorité du bruit produit est dans la gamme audible. Un intérêt particulier sera cependant porté aux fréquences de 50 kHz à 1MHz, qui peuvent ou non masquer une caractéristique du bruit d'une fuite.

Ce stage pourra être un préambule à une thèse dont le sujet est le traitement d'antenne pour la détection d'une fuite dans un GV.

### ■ Formation souhaitée :

BAC+5 en physique, acoustique, instrumentation ou traitement du signal.

### ■ Durée du stage :

5 ou 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Stage surtout basé sur l'expérimentation

### ■ Mots clés :

GV, ébullition, acoustique

### ■ Possibilité de thèse :

oui

### ■ Contact :

MICHEL Frédéric

Michel.frederic@cea.fr





## Développement d'un système électronique embarqué pour l'instrumentation électromagnétique

DTN/STCP/LISM

**Stage permettant de mobiliser l'essentiel des compétences en développement électronique : conception hardware numérique, analogique et logicielle, modélisation, programmation embarqué, prototypage et essais d'un système électronique complet**

Le Laboratoire d'Instrumentation Systèmes et Méthodes (LISM) contribue au développement de l'instrumentation pour les systèmes d'énergie bas carbone (réacteurs nucléaires expérimentaux, réacteurs à eau pressurisée, prochaines générations de réacteurs et systèmes conventionnels de production d'énergie décarbonée).

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 caloporteurs métalliques. Les débitmètres à distorsion de flux (DDF) reposent sur l'interaction de leur champ magnétique avec la vitesse d'écoulement d'un métal liquide. Ils nécessitent d'être alimentés par un courant électrique de fréquence et de forme spécifiques. Les signaux qu'ils délivrent requièrent un traitement spécial pour en déduire la vitesse d'écoulement du fluide.

La contribution proposée concerne l'étude, la fabrication et le test d'un système électronique capable de fournir le courant nécessaire au DDF et d'acquérir et traiter les signaux qu'il retourne. Ce système sera modulaire et communiquant. Il sera doté d'une interface graphique et de fonctionnalités de stockage.

Ce stage permettra de mettre en pratique les compétences suivantes :

- électronique numérique : microcontrôleurs STM32F767 (carte STM NUCLEO), environnements STM CubeIDE-CubeMx, affichage graphique,
- synthèse numérique de signal, traitement du signal,
- étage de puissance linéaire et à commutation,
- électronique analogique : acquisition et mise en forme de signaux analogiques,
- connaissance et utilisation de protocoles de transmission d'informations via Bluetooth, USB, Ethernet, liaison série de type RS485 (ModBus), SPI, I2C
- mise en œuvre de support de stockage de type carte Secure Digital,
- schématisation / création de circuit imprimés sur DesignSpark
- logiciel de simulation électronique de type SPICE (LT Spice, TINA Spice).

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, excel

### ■ Mots clés :

Microcontrôleur, STM32, système embarqué, CAN, ADC,

### ■ Possibilité de thèse :

non

### ■ Contact :

REY Frédéric  
frederic.rey@cea.fr



# Étude et optimisation du processus de Fabrication Additive par Fused Filament Fabrication (FFF) en vue de la fabrication de composant de capteurs.

DES/IRESNE/DTN/STCP/LISM

La fabrication additive, plus communément appelée impression 3D, est une technologie de production en pleine expansion. Parmi les différentes techniques d'impression 3D, le dépôt de fil fondu (*Fused Filament Fabrication - FFF*), est largement utilisée pour sa simplicité et son accessibilité. Cette technologie consiste à extruder un filament thermoplastique à travers une buse chauffée, permettant de déposer le matériau couche par couche afin de former une pièce finale. La FFF est utilisée dans une variété de domaines, allant de la fabrication de prototypes rapides à la production de pièces fonctionnelles, grâce à sa flexibilité dans le choix des matériaux et la géométrie des pièces.

Le stage se déroulera au sein du Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes (LISM). Il aura pour but d'approfondir la compréhension des différentes étapes du processus de fabrication additive par dépôt de fil fondu (FFF), avec un accent particulier sur la production de pièces métalliques nécessitant un traitement post-impression pour obtenir des caractéristiques structurales souhaitées et des propriétés mécaniques optimales.

Le/la stagiaire aura pour mission de :

## 1. Étudier les étapes de fabrication

- Paramètres de fabrication : étude de l'influence de plusieurs paramètres du processus (température de l'extrudeuse, vitesse d'impression, hauteur de couche, taux de remplissage, etc.) sur la qualité des pièces imprimées.
- Optimisation du processus d'impression pour garantir la reproductibilité et la qualité des pièces produites.

## 2. Étudier les étapes de déliantage et de frittage :

- Déliantage chimique et thermique : après l'impression, les pièces réalisées en FFF nécessitent un déliantage, c'est-à-dire l'élimination des liants polymères. Le candidat étudiera l'efficacité des différents procédés de déliantage chimique (extraction de liants) et thermique (évaporation des liants résiduels).
- Cycle de frittage : le frittage consiste à chauffer les pièces afin de densifier les particules de matériau et d'atteindre

les propriétés mécaniques souhaitées. L'optimisation du cycle de frittage (température, vitesse de chauffe, durée de maintien, etc.) sera un aspect clé du stage afin de maximiser la densité et la résistance des pièces finales.

## 3. Caractérisation des pièces fabriquées :

- Après la fabrication et le traitement des pièces, le/la stagiaire réalisera une série de caractérisations mécaniques. Il/elle effectuera des essais de traction afin de déterminer les propriétés mécaniques des pièces (résistance mécanique, limite d'élasticité, module d'Young...)

Ce stage représente une opportunité de participer activement à l'optimisation d'une technologie de pointe dans le domaine de la fabrication additive, tout en acquérant des compétences pratiques en étude de procédés et en caractérisation mécanique.

## Compétences générales souhaitées :

Savoir-faire : fabrication additive, gout pour l'expérimental

Savoir-être : Esprit d'initiative, dynamisme, travail en équipe, rigueur

Lieu de travail : CEA Cadarache (50km d'Aix en Provence).

Avantages : Déjeuner en restaurant d'entreprise. Possibilité de loger dans une résidence étudiante à côté du centre. BUS d'entreprise gratuit. (<http://www.habitat-pluriel.fr/residences/le-hameau>)

## ■ Formation souhaitée :

BUT Science et Génie des Matériaux (SGM)  
BUT Mesures Physiques (MPH)  
BUT Génie des procédés

## ■ Formation souhaitée : ■ Durée du stage :

12 semaines

## ■ Méthode/logiciel(s) :

■ Durée du stage :  
Suite office, Solidworks, IdeaMaker, Caractérisation expérimentale

## ■ Mots clés : ■ Méthode/logiciel(s):

Fabrication Additive, FFF, Procédé, Déliantage, Frittage

## ■ Mots clés : ■ Possibilité de thèse:

Non

## ■ Possibilité de thèse : ■ Contact :

FOSSÉ Bastien  
bastien.fosse@cea.fr  
■ Contact :





# Etude et modélisation d'un procédé ultrasonore de détection d'impuretés dans le sodium liquide

DTN/STCP/LISM

**Le stage se déroulera au sein du Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes (LISM) dans le cadre du développement des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide (RNR-Na). Les propriétés chimiques du sodium conduisent à différentes possibilités de création d'impuretés. Il transporte notamment des produits de corrosion activés qui se déposent ensuite à divers endroits du réacteur, notamment les parties froides. Divers dispositifs et procédés dédiés à la chimie du sodium permettent de quantifier les impuretés présentes dans le sodium.**

## Descriptif :

La méthode de quantification d'impuretés utilisée jusqu'à maintenant est basée sur des appareils au fonctionnement simple, mais dont la lecture de la mesure et l'interprétation nécessitent un personnel expérimenté. De plus, le temps de réponse de ce procédé est long.

Le stage vise donc à explorer l'utilisation d'un nouveau procédé à base de techniques ultrasonores permettant de contrôler, avec un temps de réponse réduit, la pureté du sodium.

Dans un premier temps, le stagiaire prendra connaissance des propriétés du sodium et des conditions environnantes de la méthode conventionnelle. En parallèle, il se familiarisera avec les performances attendues d'un tel système. Le tout formera le cahier des charges (CDC) à respecter pour la suite de l'étude.

Dans un second temps, le stagiaire effectuera une étude des matériaux / instruments de mesures présentant les propriétés requises au respect du CDC.

Puis des simulations analytiques / multiphysiques (COMSOL) seront menées sur la base des candidats retenus. L'idée est ici de caractériser l'instrument soumis à une variation

de l'épaisseur des dépôts d'impuretés.

Enfin, les résultats obtenus nous permettront de statuer sur la faisabilité et la performance du système.

Suivant l'avancement du stage, des expérimentations pourront être envisagées avec le matériel présent au laboratoire.

## Compétences générales souhaitées :

Savoir-faire : Instrumentation, acoustique, modélisation.

Savoir être : Esprit d'initiative, dynamisme, travail en équipe, rigueur.

Lieu de travail : CEA Cadarache (50km d'Aix en Provence).

Avantages : Déjeuner en restaurant d'entreprise. Possibilité de loger dans une résidence étudiante à côté du centre. Bus d'entreprise gratuit.

(<http://www.habitat-pluriel.fr/residences/le-hameau>)

Ce stage représente une opportunité de participer activement à l'optimisation d'une technologie de pointe dans le domaine de l'instrumentation ultrasonore en milieux extrêmes.

## ■ Formation souhaitée :

Elève en 3ème année d'école d'ingénieur ou équivalent

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Suite bureautique Office, Python, Comsol, Solidworks

## ■ Mots clés :

Sodium, Impuretés, Instrumentation, Ultrason, Modélisation

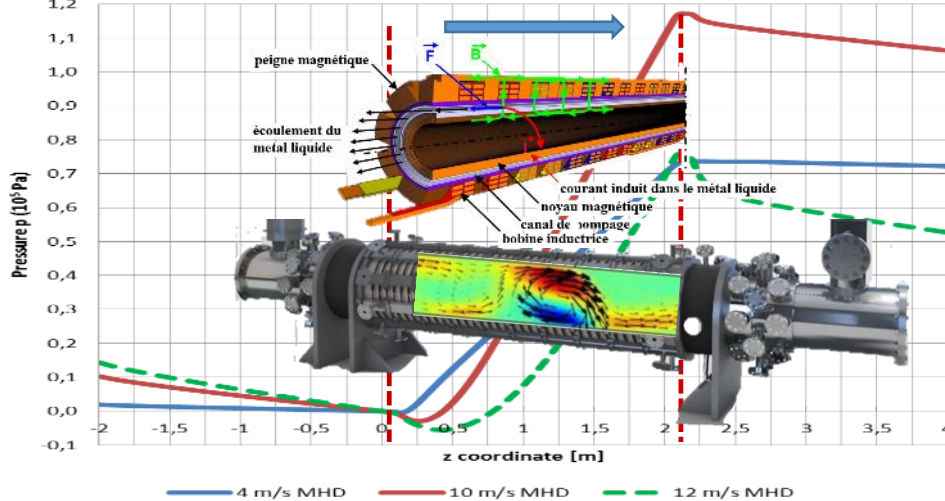
## ■ Possibilité de thèse :

À discuter

## ■ Contact :

JEAN Mathieu  
Mathieu.jean@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 en vue de son instrumentation

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 circuits nucléaires où leur usage est possible, i.e. en deçà 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'interaction 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 comportements sous l'angle de vue de leur détection et de leur caractérisation en prévision de leur prévention et de leur maîtrise via l'instrumentation et la traitement du signal adaptés.

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, magnétohydrodynamique, MHD, modélisation numérique, simulation numérique

### Durée du stage :

6 mois  
Logiciels de modélisation – simulation numériques du couplage électromagnétisme / mécanique / logiciel de programmation structurée / objet

### Mots clés :

Electromagnetisme, mécanique des fluides, turbulence, multiphysique, MHD, magnétohydrodynamique

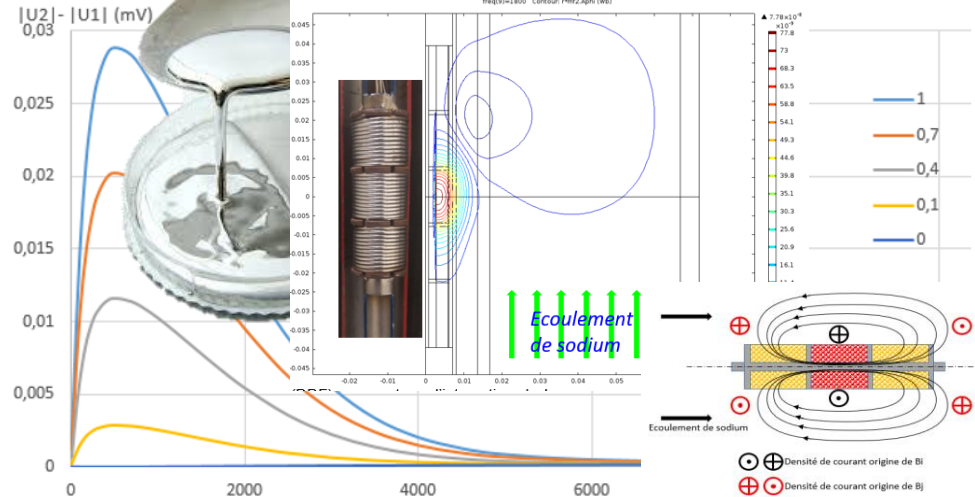
### Possibilité de thèse :

non

### Contact :

REY Frédéric  
frederic.rey@cea.fr





## Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un transducteur électromagnétique DDF

DTN/STCP/LISM

### Stage relatif à l'emploi de méthodes numériques de modélisation et simulation pour caractériser la réponse d'un transducteur reposant sur l'interaction d'un champ électromagnétique périodique avec un fluide métallique en écoulement turbulent voire en présence de bulles

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. 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 ou le plomb, font partie de ces caloporteurs particuliers. La connaissance du débit de ces fluides voire la capacité à détecter et caractériser la présence éventuelle de bulles de gaz qu'ils pourraient transporter est essentielle. Le LISM conçoit des débitmètres spécifiques pour les caloporteurs métalliques. En particulier, les transducteurs dits « Débitmètres à Distorsion de Flux » (DDF) reposent sur l'interaction de leur champ magnétique périodique avec la vitesse d'écoulement d'un métal liquide.

Dans le cadre du projet concerné, un DDF est utilisé pour caractériser la vitesse de l'écoulement de métal liquide qui est à sa proximité immédiate. La réponse de ce transducteur peut aussi être exploitée pour caractériser la présence de bulles. Des expérimentations sont prévues tant pour évaluer la réponse d'un DDF à la vitesse d'écoulement que de la présence de bulles.

Préalablement à la réalisation d'expérimentations, il est nécessaire de dimensionner les DDF dédiés à ces travaux. Pour cela, il sera fait recours à la modélisation et aux simulations numériques. L'interprétation des résultats expérimentaux bénéficiera de la disponibilité de ces modèles numériques et viendra par ailleurs les conforter.

La contribution à ce projet consistera à étudier la réponse des DDF suivant les situations souhaitées par modélisation et simulation numériques. Les modèles les plus élémentaires –bidimensionnels– permettront d'abord d'apprécier la réponse du DDF vis-à-vis du mouvement d'un fluide métallique s'écoulant à proximité du transducteur sans transport de bulles. Ces modèles ne sont pas capables de traduire tels qu'on peut le souhaiter la réaction d'un DDF face à un écoulement transportant du gaz fractionné en bulles à spectre dimensionnel donné. Pour accéder à cela, il sera fait recours à des modèles tri-dimensionnels.

École d'ingénieur, Bac+5

Spécialité physique, mécanique des fluides, turbulence, électromagnétisme, magnétohydrodynamique, MHD, modélisation numérique, simulation  
Formation souhaitée :

#### ■ Durée du stage :

6 mois

Logiciels de modélisation – simulation numériques du couplage électromagnétisme / mécanique des fluides, magnétohydrodynamique, MHD

#### ■ Mots clés :

Électromagnétisme, mécanique des fluides, turbulence, multiphysique, magnétohydrodynamique, MHD

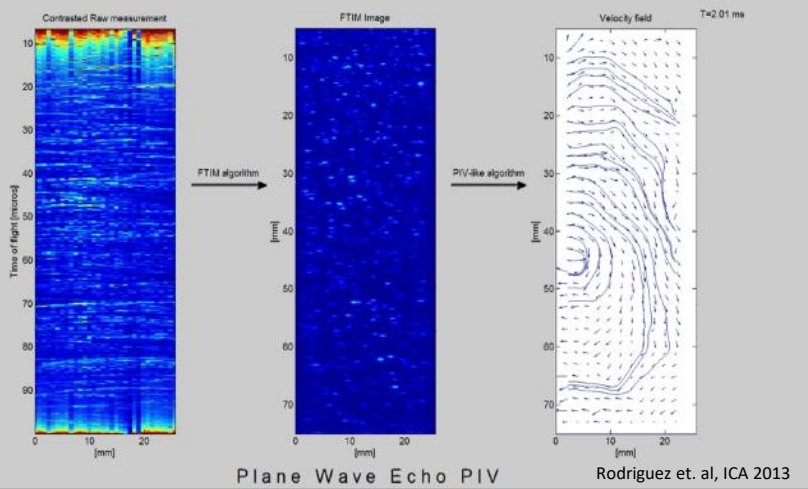
#### ■ Possibilité de thèse :

non

#### ■ Contact :

REY Frédéric  
frederic.rey@cea.fr





## Développement de traitements d'images pour la vélocimétrie par imagerie de particules

DTN/STCP/LISM

**L'objectif de ce stage est de développer un code de traitement permettant le calcul de champ de vitesse par inter-corrélation d'images ultrasonores de traceurs.**

Un champ de vitesse 2D est une image représentant en chaque point l'intensité et la direction de la vitesse du fluide étudié. C'est une quantité importante lors de l'étude précise du comportement d'un fluide, car elle permet de visualiser le mouvement de celui-ci ainsi que les zones de plus ou moins fortes vitesses. Le champ de vitesse permet d'étudier les turbulences, les mélanges, les zones de recirculation ou les zones mortes, mais également de déduire un champ de pression ou une viscosité dynamique. Les applications de ce type de mesure sont très variées et concernent aussi bien la recherche que différents domaines industriels.

Les principales méthodes de vélocimétries reposent aujourd'hui sur la corrélation d'images de traceurs : des microparticules solides ou microbulles de gaz injectées dans l'écoulement qui permettent de retracer le mouvement de ce dernier.

Dans le cadre du développement d'une méthode ultrasonore de vélocimétrie par imagerie de particules (écho-PIV) le LISM (Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes) souhaiterait développer des codes de calculs permettant de remonter au champ de vitesse.

L'objectif de ce stage sera, dans un premier temps, de s'approprier les méthodes de corrélations d'images pour le calcul de champs de vitesses présentes dans la littérature. Dans un second temps, une évaluation des capacités des codes open-source de PIV sera effectuée. Par la suite, en se basant éventuellement sur l'existant, le stagiaire devra développer un algorithme (sous Python) permettant de déterminer le champ de vitesse résultant de la corrélation de deux images successives de microparticules dans un écoulement. Des mesures expérimentales pourront être réalisées afin de valider les traitements développés.

En fonction du profil du stagiaire et de l'avancée du stage, l'étude des potentialités de l'IA (machine learning ou deep learning) pour améliorer la qualité des images acoustiques dans des configurations spécifiques pourra être explorée.

### ■ Formation souhaitée :

Master 2 Physique générale/mesure physique ou Ingénieur ayant suivi un parcours généraliste

Master 2 Informatique ou ingénieur ayant suivi une spécialisation en informatique

### ■ Durée du stage :

4 à 6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Particle Image Velocimetry, Python, éventuellement Comsol

### ■ Mots clés :

Algorithme, traitement d'images, corrélation, vélocimétrie.

### ■ Possibilité de thèse :

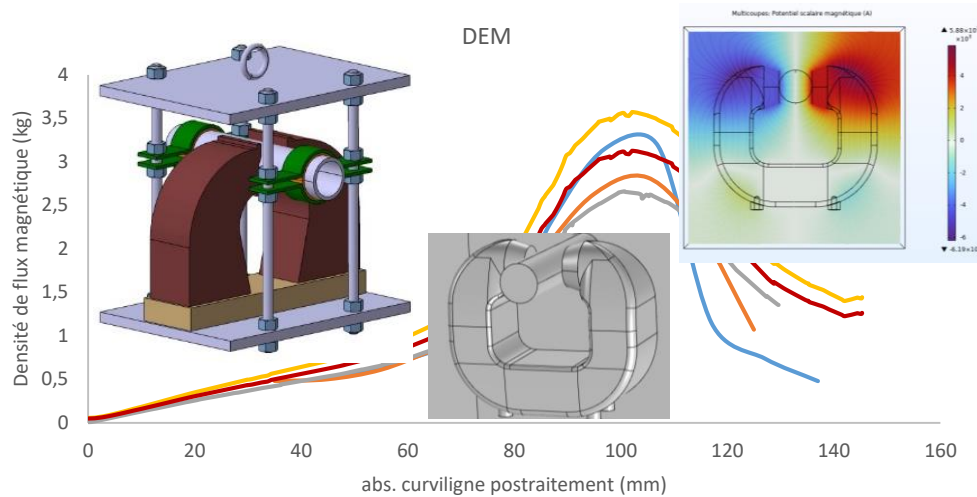
Non

### ■ Contact :

FERMÉ Jules, CAVARO Matthieu  
[Jules.ferme@cea.fr](mailto:Jules.ferme@cea.fr)

[Matthieu.cavaro@cea.fr](mailto:Matthieu.cavaro@cea.fr)





# Modélisation numérique et simulation magnétohydrodynamique d'un transducteur électromagnétique de mesure de débit

DTN/STCP/LISM

**Stage relatif à l'emploi de méthodes numériques de modélisation et simulation pour caractériser la réponse d'un transducteur reposant sur l'interaction d'un champ électromagnétique à excitation stationnaire avec un fluide métallique en écoulement turbulent en régime stationnaire puis en régime transitoire rapide**

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. 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, font partie de ces caloporteurs particuliers. La connaissance du débit de ces fluides tant en régimes stationnaires d'écoulement qu'à chaque instant en régimes transitoires est essentielle. Les régimes stationnaires correspondent à un écoulement, le plus souvent turbulent, sans variation temporelles de ces grandeurs moyennes. En transitoires, les grandeurs moyennes, a minima, varient dans le temps et cela d'autant plus vite que le transitoire est rapide.

Le LISM conçoit des débitmètres spécifiques pour les caloporteurs métalliques. En particulier, les débitmètres dits « électromagnétiques » (DEM), reposent sur l'interaction de leur champ magnétique à excitation stationnaire avec la vitesse d'écoulement d'un métal liquide, dite magnétohydrodynamique (MHD). Au premier ordre, leur réponse électrique dépend du champ des vitesses fluide interagissant avec leur champ magnétique. Comme tout transducteur, les DEM sont impactés par un temps de réponse caractéristique, différant l'évolution de leur réponse vis-à-vis d'une évolution des conditions d'écoulement du fluide.

Différentes expérimentations et études analytiques ont déjà été réalisées sur ces transducteurs. On souhaite maintenant utiliser les moyens de la simulation numériques pour mieux caractériser leur réponse.

La contribution attendu consistera à mettre en place et utiliser des outils de simulation numériques pour simuler l'interaction magnétohydrodynamique au sein de DEM de différentes tailles. Il s'agira d'étudier leur réponse stationnaire lors de différentes situations d'écoulement. Ensuite la réponse transitoire sera caractérisée dans le cadre d'une variation rapide de vitesse. La constante de temps sera déterminée.

## ■ Formation souhaitée :

École d'ingénieur, Bac+5

Spécialité physique, mécanique des fluides, turbulence, électromagnétisme, magnétohydrodynamique, MHD, modélisation numérique, simulation

## ■ Durée du stage :

6 mois

Logiciels de modélisation – simulation numériques du couplage électromagnétisme / mécanique / thermique / logiciel de programmation structurée / objet

## ■ Mots clés :

Electromagnetisme, mécanique des fluides, turbulence, multiphysique, MHD, magnétohydrodynamique

## ■ Possibilité de thèse :

non

## ■ Contact :

REY Frédéric

frederic.rey@cea.fr





# Application de méthodes d'imageries ultrasonores pour la détection de défaut de soudure en réacteur

DTN/STCP/LISM

**Le stage se déroulera au sein du Laboratoire d'Instrumentation, Systèmes et Méthodes (LISM) dans le cadre du développement des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium liquide (RNR-Na). Dans ces conditions extrêmes, le besoin de contrôle non destructif (CND) entraîne le développement de méthodes innovantes. Dans ce cadre, l'imagerie ultrasonore joue un rôle essentiel afin de détecter des défauts proches ou à travers soudures.**

## Descriptif :

Les caractéristiques du Sodium (Na) lors d'un arrêt réacteur (200°C, milieu opaque, gamma...) induisent le développement d'instrumentations spécifiques. Ces capteurs doivent donc être testés dans des conditions similaires ainsi que sur des maquettes représentatives. Notamment, le CND US de pièces spécifiques immergées en Na fait l'objet d'études avancées au CEA. L'eau étant un simulant sur le plan acoustique. Par conséquent, la mise au point des méthodes de mesure est réalisée dans un banc d'essais en eau.

Dans un premier temps, le stagiaire se familiarisera avec les capteurs ultrasonores développés au LISM. Il prendra en main le banc d'essais et les méthodes de caractérisations associées aux capteurs.

Plus précisément, il sera amené à étudier les champs US des transducteurs, notamment d'un prototype multiéléments.

Dans un second temps, le stagiaire mettra en œuvre des techniques d'inspection sur une maquette d'une pièce de RNR-Na appelée « Platelage ». Pour cela, il s'appuiera sur les protocoles et simulations déjà réalisés au laboratoire. L'objectif est de comparer les différentes instrumentations disponibles et

d'établir leurs performances de détection.

En parallèle, il sera possible de modéliser sur CIVA la maquette avec pour objectif une compréhension des observations expérimentales.

## Compétences générales souhaitées :

**Savoir-faire :** Instrumentation, acoustique, modélisation.

**Savoir être :** Esprit d'initiative, dynamisme, travail en équipe, rigueur.

**Lieu de travail :** CEA Cadarache (50km d'Aix en Provence).

**Avantages :** Déjeuner en restaurant d'entreprise. Possibilité de loger dans une résidence étudiante à côté du centre. Bus d'entreprise gratuit.

(<http://www.habitat-pluriel.fr/residences/le-hameau>)

Ce stage représente une opportunité de participer activement à l'optimisation d'une technologie de pointe dans le domaine de l'instrumentation ultrasonore en milieux extrêmes.

## ■ Formation souhaitée :

Elève en dernière année d'école d'ingénieur ou équivalent (M2).

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s):

Suite bureautique Office, Python, MatLab, CIVA

## ■ Mots clés :

Sodium, CND, Instrumentation, Ultrason, Modélisation

## ■ Possibilité de thèse :

À discuter

## ■ Contact :

Galeron Gaëtan  
[Gaetan.galeron@cea.fr](mailto:Gaetan.galeron@cea.fr)





# Simulation CFD et interprétation d'essais de convection naturelle avec auto-vaporisation gravitaire en piscine de refroidissement

DTN/STCP/LTHC

**Une première campagne d'essais, reproduisant à échelle réduite les transferts de masse et de chaleur s'opérant en piscine de refroidissement d'installations nucléaires, a été réalisée à l'aide du dispositif expérimental AQUARIUS. Lors de ce stage, il s'agira de simuler au moyen d'un logiciel de CFD certains de ces essais et de proposer une interprétation physique des résultats disponibles.**

Les systèmes de refroidissement de nombreuses installations nucléaires comportent des bassins contenant un important volume d'eau pour dissiper la chaleur émise par les combustibles. Pour évaluer les performances de ces différents systèmes, il est primordial de bien comprendre et de correctement modéliser les transferts de masse et de chaleur pouvant s'opérer en bassin chauffé. Si le fonctionnement normal de tels bassins est aisément prédictible, leur comportement en situation accidentelle est pour l'heure jugé incertain par la communauté internationale.

En effet, lors d'un accident nucléaire avec un fort dégagement de chaleur par les combustibles, l'eau de ces bassins est amenée à se vaporiser, limitant à terme leur capacité de refroidissement. Or, si deux des trois mécanismes de changement de phase accidentellement à l'œuvre en bassin sont relativement bien connus, i.e. l'évaporation et l'ébullition nucléée sur paroi chauffante, le mécanisme dit d'auto-vaporisation gravitaire, propre aux bassins de grande profondeur, est insuffisamment compris. Le phénomène, que l'on retrouve dans divers systèmes naturels ou industriels assimilables à des canaux verticaux chauffés par le bas, a été peu étudié dans la configuration spécifique d'un bassin et n'a été mis en évidence dans cette dernière que très récemment.

Afin de pallier ces incertitudes, deux expériences de laboratoire idoines ont été réalisées, parmi lesquelles figure AQUARIUS, objet de ce stage. Le dispositif d'essais AQUARIUS consiste en un bassin de 54 L et de 40 cm de hauteur, disposant en partie basse d'une source de chaleur délivrant jusqu'à 1 kW de puissance. Au cours des essais, l'ensemble du dispositif est mis en dépression, entre 20 et 40 mbar, afin de reproduire à petite échelle et basse

température les conditions propices à la manifestation en piscine de l'auto-vaporisation gravitaire.

A ce jour, une première campagne d'essais a été réalisée. Cette dernière a permis de mettre en évidence le phénomène dans la configuration d'un bassin chauffé et de constituer une première base de données expérimentales. Au cours du stage, le candidat devra analyser puis interpréter ces résultats. Pour ce faire, des études de type CFD seront réalisées à l'aide du logiciel OpenFOAM. Après une mise en données du dispositif AQUARIUS, différents modèles de vaporisation et de turbulence diphasique à l'état de l'art seront implémentés. Puis des simulations numériques de certains essais préalablement identifiés seront réalisées. La confrontation de ces modèles à des données expérimentales permettra ainsi d'en apprécier le caractère prédictif et de proposer une interprétation physique des observations réalisées à ce jour à l'aide d'AQUARIUS.

A l'issue de ce stage, une poursuite en thèse sur la même thématique est possible. Lors de la thèse, il s'agira de poursuivre les expérimentations sur le dispositif AQUARIUS. A court terme, une évolution de son bassin sera entreprise par le candidat, afin de pouvoir mettre en œuvre une instrumentation avancée (PIV 3D couplée à de l'ombroscopie), non utilisée à ce jour. A moyen terme, de nouveaux essais seront à réaliser, afin de caractériser plus finement le phénomène. Ces données nouvelles permettront alors la validation ou l'élaboration de modèles appropriés à la simulation de la thermohydraulique des piscines.

## ■ Formation souhaitée :

Dernière année d'école d'ingénieur ou de Master, avec une spécialisation en thermohydraulique, thermique ou mécanique des fluides

## ■ Durée du stage :

6 mois

## ■ Méthode/logiciel(s) :

OpenFOAM, ParaView, Python

## ■ Mots clés :

Thermohydraulique nucléaire, vaporisation, convection naturelle, simulation numérique, CFD

## ■ Possibilité de thèse :

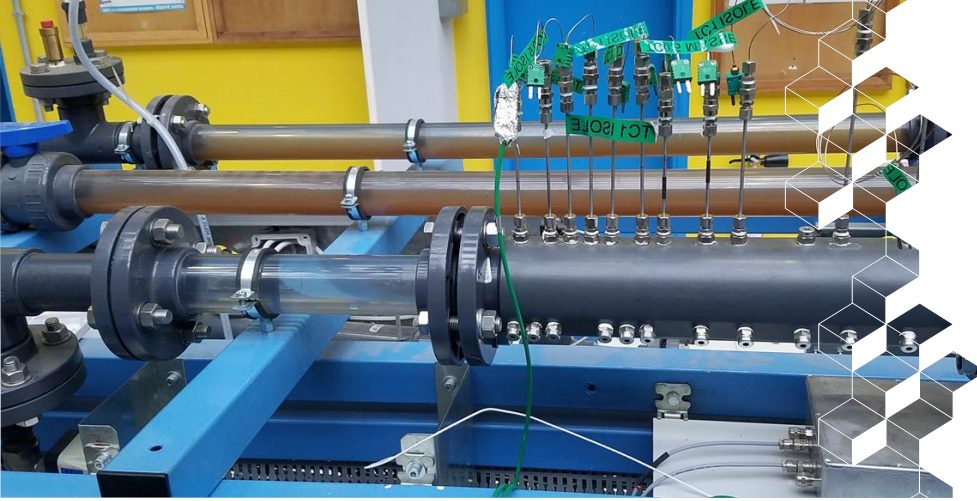
Oui

## ■ Contact :

Jimmy MARTIN

Jimmy.martin@cea.fr





# Etude de la mesure de débit dans une canalisation par détection des bruits thermiques

DTN/STCP/LTHC

## Le sujet porte sur l'amélioration d'une technique de mesure de débit.

Les méthodes actuelles sont souvent intrusives et nécessitent des interventions complexes, ce qui entraîne des coûts et des délais importants, surtout dans des environnements réglementés comme le nucléaire. Pour contourner ces contraintes, le CEA a développé une méthode de mesure de débit basée sur l'analyse de la propagation de signaux thermiques dans un écoulement non isotherme. Son principe repose sur les relevés temporels de température à deux endroits de la canalisation. Les fluctuations thermiques enregistrées en amont sur le premier point de mesure sont transportées par l'écoulement en aval sur le second point de mesure. Par comparaison des deux signaux enregistrés, il est possible de calculer le temps de vol entre les deux capteurs et d'en déterminer une vitesse d'écoulement et donc un débit.

La première partie de ce stage consistera à réaliser une revue bibliographique concernant cette méthode de mesure et les techniques de traitement du signal associées. A partir de celles-ci, le stagiaire proposera, au travers d'un programme en Python, une amélioration de la méthode actuellement utilisée pour déterminer la vitesse et le débit.

Ce stage pourra être suivi d'une thèse.

### ■ Formation souhaitée :

Mécanique des fluides,  
traitement du signal

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s):

Python

### ■ Mots clés :

Débitmètre, instrumentation,  
écoulements anisothermes

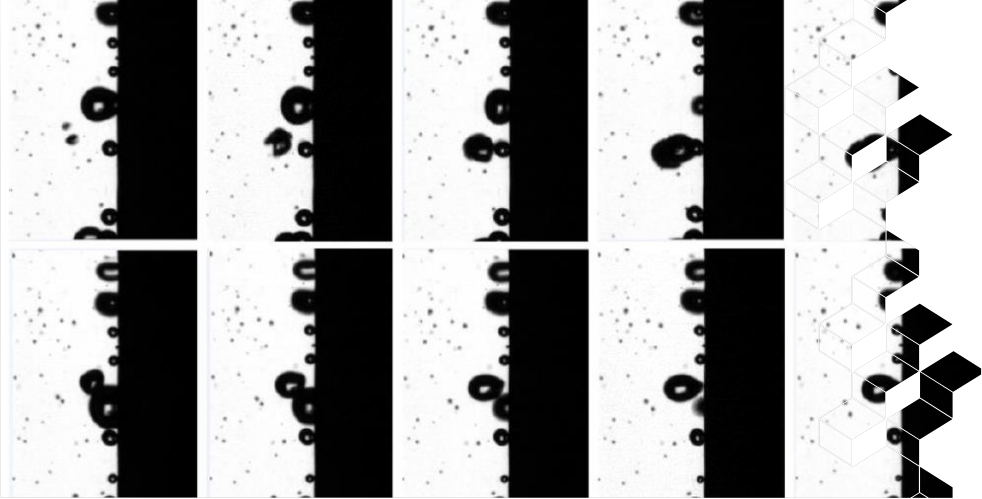
### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

GUENADOU David  
david.guenadou@cea.fr





## Conception et tests de dispositifs expérimentaux pour l'étude de l'ébullition en conditions réacteur

DTN/STCP/LTHC

**Afin d'étudier l'ébullition dans des conditions de hautes pressions et températures, un stage est proposé afin de concevoir, construire et tester des dispositifs expérimentaux destinés à mesurer les caractéristiques de l'écoulement.**

L'ébullition à hautes pressions et températures constitue un point de vigilance clé pour la sûreté des réacteurs. Les nombreux travaux sur ce sujet réalisés par le passé montrent leur limitation en terme de représentativité et présentent certaines lacunes. Dans ce cadre, le laboratoire LTHC (plateforme POSEIDON) se dote d'une installation expérimentale afin d'étudier et caractériser l'ébullition nucléée pour une large gamme de conditions de pressions et températures et plus particulièrement le couplage entre la thermique de la paroi et l'écoulement (tailles de bulles, fréquence de détachement, taux de vide local, ...). Ce travail permettra de mieux comprendre les écoulements diphasiques à haute pression et de fournir des données relatives aux modèles d'ébullition susceptibles d'être utilisés dans les outils de calcul numérique.

La section d'essais comportera :

- Une plaque chauffante sur laquelle l'ébullition prendra naissance,
- Des hublots afin de visualiser et caractériser l'écoulement avec des techniques optiques et de traitement d'images,
- Un système non-intrusif de mesure de température de la paroi.

Pour ce dernier, plusieurs procédés innovants (réseau de thermocouples, fibres optiques, thermographie infrarouge,...) sont à l'étude.

Le candidat devra ainsi :

- Proposer un ou plusieurs montages répondant aux besoins en mesures et compatibles avec les conditions d'essais,
- En réaliser la conception mécanique et logicielle,
- Initier et suivre la fabrication de prototypes simples,
- Tester et qualifier ces prototypes en vue de leur intégration dans le montage final.

A l'issue du stage, le travail pourrait ouvrir sur une thèse avec la mise en œuvre du dispositif complet, la formation d'une base de données expérimentales et leur confrontation aux modèles existants.

Le candidat recherché aura un profil d'ingénieur avec des compétences en conception (mécanique et logicielle) et des connaissances en mécanique des fluides et thermique.

### ■ Formation souhaitée :

Ingénieur généraliste ou en énergétique avec des compétences en conception mécanique et logicielle et en instrumentation

### ■ Durée du stage :

6 mois

### ■ Méthode/logiciel(s) :

Conception, mécanique, CAO

### ■ Mots clés :

Ebullition, haute pression, expérimental, conception

### ■ Possibilité de thèse :

Oui

### ■ Contact :

BOTTIN Manon

Manon.bottin@cea.fr



2025



Retrouvez toutes nos offres de  
stage sur  
[cea.fr/energies/iresne](http://cea.fr/energies/iresne)

*Discover all our  
internship offers on  
[cea.fr/energies/iresne](http://cea.fr/energies/iresne)*

Photos : A.Aubert/CEA

[iresne@cea.fr](mailto:iresne@cea.fr)  
04 42 25 20 71

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

