

**Contrat post-doctoral**  
**(domaine : Simulation en Mécanique des Fluides)**  
**au CEA Saclay**

Simulation des écoulements d'hélium supercritique  
dans les circuits de refroidissements des tokamaks

**Contexte :**

La fusion thermonucléaire est une voie prometteuse pour répondre aux besoins d'énergie des futures générations. Une communauté scientifique internationale (chercheurs et ingénieurs) travaille afin de démontrer la faisabilité technique des réacteurs de fusion. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est en cours de construction à Cadarache en France pour un premier plasma en 2025. Les réacteurs DEMO sont actuellement à l'étude de conception en Europe et en Chine.

La future opération des réacteurs de fusion pose la question de la sûreté des installations, notamment des systèmes de refroidissement par eau des composants exposés aux réactions nucléaires, comme dans les réacteurs de fission, mais aussi des circuits de refroidissement cryogéniques, spécifiques aux réacteurs de fusion nécessitant des aimants supraconducteurs et des cryo-pompes.

Les aimants supraconducteurs assurent le confinement magnétique du plasma et sont refroidis par de l'hélium supercritique à 5 bar et 4.4 K. Les cryo-pompes reposent sur les phénomènes d'adsorption des impuretés du plasma (Hydrogène, Néon, Hélium) par des charbons actifs refroidis par de l'hélium à 5 bar et 3.6 K.

Le principal risque accidentel est la rupture de ces circuits pouvant entraîner des contaminations par le tritium. Cela peut être provoqué par la perte du vide de la chambre plasma, entraînant des charges très importantes sur les circuits des cryo-pompes. Dans les aimants supraconducteurs, la grande énergie magnétique stockée (51 GJ pour ITER) peut causer des dégâts majeurs lors d'une transition incidentelle de l'état supraconducteur à l'état résistif, appelée « quench », dans le cas où cette transition n'est pas détectée suffisamment rapidement.

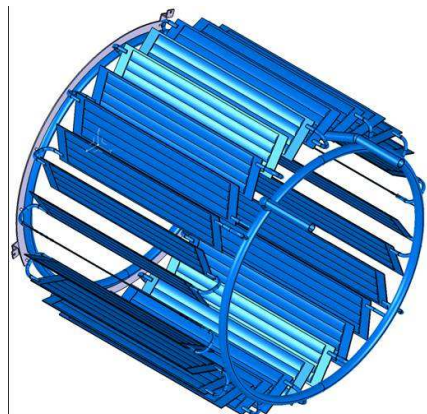


Figure 1 : circuit de distribution d'hélium des cryo-pompes d'ITER

Actuellement, les codes de thermohydraulique disponibles sont utilisés pour le dimensionnement et les études des modes d'opération. Les calculs de sûreté sur des cas accidentels exigeront des validations spécifiques qui nécessiteront des codes de thermohydraulique qualifiés vis à vis des autorités de sûreté.

### **Travail à effectuer :**

Le travail proposé dans le cadre d'un post-doctorat consiste à adapter le code CATHARE 3 (Code Avancé de THermohydraulique pour les Accidents de Réacteurs à Eau) aux circuits de refroidissement en hélium à basse température (4 K) des réacteurs de fusion.

L'étude sera menée en trois étapes. Une première phase sera dédiée à une recherche bibliographique sur la thermohydraulique de l'hélium et aussi à l'identification des relations de fermeture pour l'hélium monophasique (gaz et supercritique) disponibles dans la littérature : lois de frottement et coefficient d'échange en paroi pour les écoulements laminaires et turbulents.

Dans un deuxième temps, l'ingénieur implémentera ces lois dans le code dans le respect des bonnes pratiques de programmation. Le développement sera vérifié et validé à l'aide de cas tests élémentaires mis au point par l'ingénieur.

Enfin, la dernière partie de l'étude portera sur la validation complète du code adapté aux écoulements en hélium cryogénique. Cette validation consistera à réaliser un benchmark en comparant les résultats de CATHARE avec les résultats issus des codes de thermohydraulique de la Direction de la Recherche Fondamentale (DRF) et des données expérimentales disponibles au CEA Grenoble. Le benchmark s'appuiera sur l'étude de trois applications : étude d'une cryo-pompe, étude d'un circuit de décharge d'hélium supercritique et étude d'un câble supraconducteur. Le travail réalisé fera l'objet d'une publication dans laquelle seront présentés : les modèles développés, les résultats du benchmark ainsi qu'une analyse critique de ceux-ci.

L'ingénieur aura ainsi pleinement participé à l'extension de la base de validation de CATHARE pour les applications dédiées aux circuits de refroidissement cryogéniques.

### **CATHARE 3**

CATHARE est le code de sûreté en thermohydraulique développé depuis 1979 par EDF, AREVA-NP, IRSN et CEA. Il est utilisé par les industriels et les autorités de sûreté français et étrangers pour les études de fonctionnements nominaux et de transitoires accidentels des réacteurs nucléaires à eau pressurisée. Le domaine d'application de CATHARE a été étendu à divers concepts de réacteurs nucléaires (réacteurs de propulsion navale, réacteurs expérimentaux, réacteurs de quatrième génération,...). A cette occasion les fonctionnalités de CATHARE ont été étendues pour pouvoir traiter divers fluides, dont certains fluides cryogéniques. CATHARE est également utilisé dans les simulateurs d'ingénierie et de formation développés par les partenaires industriels français.

La modélisation des circuits caloporteurs de réacteurs nucléaires est réalisée par assemblage d'éléments hydrauliques (conduites, plenums,...), thermiques (générateur de vapeur, combustible,...) et technologiques (vannes, pompes, ...). Cette modélisation est dite à « l'échelle système ».

Deux codes sont actuellement développés dans ce projet :

- CATHARE 2 : la version industrielle
- CATHARE 3 : la version de développement en phase d'industrialisation

Le développement du logiciel « CATHARE 3 » a été lancé en 2006, dans la continuité des versions industrielles de CATHARE 2 V2.5, tout en apportant de nouvelles potentialités d'utilisation du logiciel pour les partenaires du projet, à savoir :

- une amélioration numérique du module 3D (possibilité d'augmenter le nombre de mailles, maillages multi-blocs à raccordements non-conformes,...)
- une amélioration de la physique (apport des équations traitant le multi-champ gouttes, le transport de l'aire interfaciale, la modélisation de la turbulence diphasique), permettant l'extension du domaine de validité des modèles,
- une évolution de l'architecture logicielle (couches objets, C++, ...),
- un noyau dur de fonctionnalités en non-régression par rapport à CATHARE 2 V2.5\_3, incluant en particulier les fonctions nécessaires à des calculs de brèches sur les REP et les fonctionnalités multi-filières sodium et gaz nécessaires au calcul d'un RNR-Na.
- La possibilité d'utiliser des bibliothèques de calcul de propriétés des fluides, dont certains fluides cryogéniques.

### **Profil demandé. Durée du post-doctorat.**

Le post-doctorat se déroulera au CEA à la Direction des Activités Nucléaires de Saclay, dans le Service de Thermo-hydraulique et de Mécanique des Fluides, plus précisément au sein du laboratoire qui a pour mission de développer et valider le code CATHARE Laboratoire de Modélisation et simulation à l'Echelle Système (LMES). Ce projet étant une collaboration entre le CEA Saclay, le CEA Grenoble et le CEA Cadarache, des missions à Grenoble et Cadarache seront nécessaires. Le contrat est prévu pour une durée de un an avec des réunions d'avancement régulières en présence de tous les partenaires du projet. Une présentation des travaux réalisés sera programmée au milieu et en fin de contrat.

Le candidat doit connaître la simulation en mécanique des fluides (une thèse dans le domaine de la mécanique des fluides est indispensable). Des connaissances solides en calcul scientifique et programmation sont nécessaires.

### **Contacts :**

Au CEA Saclay: [kim-claire.le-thanh@cea.fr](mailto:kim-claire.le-thanh@cea.fr), tel : 01 69 08 88 51

Au CEA Grenoble: [christine.hoa@cea.fr](mailto:christine.hoa@cea.fr), tel : 04 38 78 26 64