

« Étude d'un choc thermique au sein d'un fluide »

1) Contexte

Suite à la rupture d'une gaine de crayon combustible lors d'un accident d'injection de réactivité (RIA) au sein d'un réacteur nucléaire, du combustible fragmenté pourrait être éjecté et entrer en interaction thermique avec le réfrigérant. Dans ce cas, en raison de l'intensité du transfert de chaleur entre les particules de combustible et le réfrigérant, ce dernier peut voir localement sa pression augmenter considérablement avant de se vaporiser. Dans les cas de RIA où ni la rupture de gaine ni l'éjection de combustible ne peuvent être exclus, cette phénoménologie est à prendre en compte dans l'évaluation des risques induits et il est alors nécessaire de prédire à la fois l'amplitude de ce pic de pression transitoire et le volume de vapeur générée. Les données de la littérature ne suffisent pas à valider les outils de simulation numérique, à l'instar du logiciel CIGALON développé à l'IRSN notamment pour interpréter les essais du programme CIP qui mèneront potentiellement à une telle phénoménologie.

2) Problématique scientifique

L'objectif de cette thèse est d'exploiter une installation expérimentale dans le but de lever les verrous scientifiques liés à la dynamique de vaporisation, d'améliorer la modélisation des phénomènes physiques en présence et la validation du logiciel.

La montée en pression puis la vaporisation de l'eau entourant un crayon rompu est le résultat d'une compétition entre la cinétique du transfert de chaleur avec les particules de combustible éjectées et celle de la détente du réfrigérant. Une expérience modèle a été conçue au laboratoire CETHIL de l'INSA Lyon. La décharge rapide de condensateurs au sein d'un filament immergé permet de transférer rapidement de la chaleur au sein d'un fluide. L'utilisation de CO₂ permet de simuler le comportement thermodynamique de l'eau à haute pression au sein du réacteur, tout en réduisant les échelles de pression et d'énergie. Ce fluide est contenu dans une enceinte spécifiquement conçue et instrumentée afin de pouvoir mesurer l'évolution spatio-temporelle de la pression et de la formation de vapeur autour du filament. L'analyse de ces données, ainsi que leur modélisation à l'aide du logiciel CIGALON permettra d'améliorer la fiabilité de la prédiction d'une telle interaction thermique.

3) Déroulement de l'étude

La thèse comporterait les phases suivantes :

Réalisation d'essais et interprétation analytique (1ère année).

L'installation expérimentale existante, dont la conception, l'instrumentation et la validation sont les principaux résultats d'une thèse précédente (Adrien Abbate 2013-2017) permet de moduler les conditions des essais, à la fois en termes de condition initiale du fluide (état thermodynamique) et en termes d'intensité du signal de puissance délivré au sein du fluide. Lors de cette précédente thèse, l'analyse du potentiel et des limites d'une telle installation pour étudier le phénomène aura été acquise. L'étude approfondie de l'ensemble des configurations accessibles sera l'objectif principal de cette première phase. L'interprétation physique des signaux des capteurs et l'analyse des corrélations entre les paramètres des essais et les résultats obtenus constitueront la principale activité. Ces résultats, inédits dans la littérature feront l'objet de valorisation par publication scientifique. Enfin, de possibles modifications de l'installation expérimentale peuvent d'ores et déjà être envisagées afin d'explorer des gammes plus larges de configurations et ainsi d'améliorer la mesure des grandeurs d'intérêt. On pourra notamment considérer une évolution du système de transmission de l'énergie au fluide (augmentation de la surface d'échange du filament, ou du nombre de filaments) et du confinement du fluide recevant l'énergie (modification de la section et de la longueur du tronçon concerné).

Simulation numérique à l'aide du logiciel CIGALON (2ème année).

Le logiciel de simulation numérique CIGALON est opérationnel pour décrire la configuration expérimentale. Il permet d'estimer l'évolution de l'état du fluide pendant l'ensemble de la durée d'un essai. Néanmoins, les résultats numériques dépendent de paramètres et de modèles qui doivent être validés par la confrontation aux résultats expérimentaux obtenus. En particulier, les données expérimentales permettront de s'affranchir de la modélisation de la dynamique d'éjection du combustible pour valider les modélisations :

- de transfert de chaleur entre le filament et le fluide
- de transferts de masse et de chaleur entre les phases liquide et vapeur du fluide
- de modélisation thermodynamique de ce mélange diphasique
- de couplage entre l'expansion du fluide recevant l'énergie et la compression du fluide dans l'enceinte (volume liquide et ciel gazeux)

L'objectif de cette deuxième phase d'étude du phénomène sera ainsi d'analyser les écarts entre le calcul et l'expérience et d'en identifier la ou les origines. En outre, la sensibilité des résultats du logiciel aux différents paramètres et modèles incertains sera considérée. Encore une fois, il existe clairement un potentiel de valorisation par publication scientifique.

Proposition d'évolution de la modélisation et contribution à la validation des résultats numériques (3ème année)

La troisième et dernière phase découle naturellement des conclusions qui seront tirées de la confrontation des résultats obtenus par le logiciel à ceux de l'expérience. L'amélioration de la formulation actuelle est à envisager et des développements informatiques pourraient s'avérer nécessaires. Enfin, les enseignements tirés de l'analyse seront extrapolés au cas d'intérêt (conditions thermohydrauliques d'un REP et transfert thermique issu de fragment de combustible éjectés).

4) Apports attendus pour les différents acteurs de la collaboration

Ainsi, en réalisant cette thèse, le candidat se formera à la recherche en menant à bien, à la fois, des études expérimentales qu'il analysera de manière critique, des simulations numériques et de la modélisation. L'ensemble des résultats pourra clairement être valorisé par des publications scientifiques et des communications orales qui compléteront sa formation.

L'IRSN bénéficiera in fine d'une amélioration notable de la compréhension de la phénoménologie d'une interaction thermique en disposant de données jusqu'alors inexistantes dans la littérature et pouvant à terme améliorer la confiance accordée aux résultats des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel CIGALON dont l'utilisation est prévue pour l'exploitation des résultats de certains essais du programme CIP.

Enfin, le CETHIL valorisera ses compétences (i) dans l'étude des écoulements avec transfert de masse et (ii) dans la connaissance du comportement des fluides frigorigènes. Il acquerra en outre des compétences dans l'étude de transitoires rapides et dans l'utilisation d'instrumentation diphasique avancée (fibres optiques).

5) Encadrement et conditions matérielles

Encadrement CETHIL : Marc CLAUSSE (Directeur de thèse)
 04 72 43 85 22
 marc.clausse@insa-lyon.fr
 et Romuald RULLIÈRE
 04 72 43 63 05
 romuald.rulliere@insa-lyon.fr
 Campus LyonTech La Doua - INSA de Lyon
 Bâtiment Sadi Carnot - 9, rue de la Physique - 69621 VILLEURBANNE CEDEX

Encadrement IRSN : Pierre RUYER
 04 42 19 97 20 pierre.ruyer@irsn.fr
 BP 3, 13115 St Paul-Lez-Durance Cedex

École doctorale : ED 162 MEGA Mécanique Énergétique Génie civil Acoustique

Le travail de thèse sera réalisé dans les locaux du CETHIL (Campus LyonTech La Doua) pour la première partie puis dans les locaux de l'IRSN (Centre de Cadarache).

Type de financement : salarié de l'IRSN en CDD de trois ans.

Spécialité : Thermique, mécanique des fluides, énergétique

Prévue pour commencer à la rentrée universitaire 2017.