



Perte de refroidissement du cœur d'un réacteur nucléaire

Expérimentation, Modélisation et Simulation de l'impact de gouttes d'eau sur le gainage gonflé des assemblages combustible

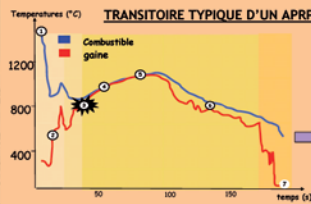
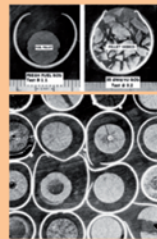
Franck Lelong, Nathalie Seiler, Georges Repetto *

Michel Gradeck, Denis Maillet **

* Direction de la Prévention des Accidents Majeurs, IRSN, BP3 13115, St Paul-Lez-Durance

** Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, CNRS UMR 7563, Nancy

Au cours d'un transitoire d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire, la vaporisation de l'eau dans la cuve d'un réacteur nucléaire peut conduire à l'assèchement et à l'augmentation de la température des crayons de combustible, au gonflement thermomécanique et à la rupture des gaines de ces crayons remplies de matériaux combustibles fragmentés (phénomène de déplacement observé lors d'expériences avec du combustible irradié). Ce gonflement peut être à l'origine d'un bouchage significatif d'une partie du cœur et compromettre ainsi son refroidissement lors de la phase de renoyage du cœur par l'eau injectée avec les systèmes de sécurité.



Objectif de l'étude : amélioration de la prédiction des transferts thermiques liés à l'impact des gouttes d'eau (vaporisation de l'eau au contact du bas des crayons) sur les gaines gonflées à l'aide de simulations à l'échelle locale des écoulements diphasiques dite 'Computational Multi Fluid Dynamics'

Deux phases : a) mesurer dans une configuration simplifiée mais représentative d'un APRP, les bilans de transferts de masse et d'énergie au niveau de l'impact des gouttes d'eau sur une plaque chaude (support expérimental au LEMTA) et b) améliorer et développer des modèles dans un code de thermohydraulique locale, valider sur les expériences et simuler le comportement des gaines lors de la phase de refroidissement (support modélisation/simulation au LEIDC de l'IRSN)

Expérimentation au LEMTA Gouttes isolées impactant une paroi chaude

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Gouttes isolées

- Eau distillée, Température ambiante
- Vitesse : 2 m/s à 5 m/s,
- Diamètre : 80 μm à 200 μm.

Paroi

- Nickel, T=600-800°C,
- Diamètre ~10 mm, épaisseur 500 μm,
- Angle d'incidence de la goutte variable de 0 à 90° : inclinaison de l'horizontale à la verticale,
- État de surface et rugosité indifférents.

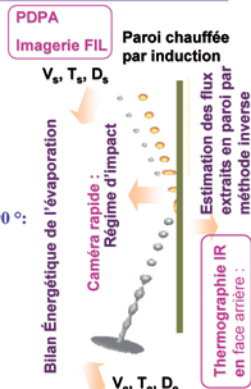
Atmosphère

- Atmosphère de vapeur saturée ou air
- Pression atmosphérique

MESURES REALISEES

- Régimes d'impact & flux extraits en paroi
- Vitesse et Température
- Diamètre de la goutte avant & après impact

→ Accès au Bilan Énergétique complet



PDDA (granulométrie par Analyse phase Doppler)
Fluorescence induite par Laser à 2 couleurs

Compréhension des phénomènes physiques et Modélisation des transferts de chaleur en paroi à partir des résultats expérimentaux

Fluorescence induite à 2 couleurs

Liquide + traceur fluorescent

Excitation Laser

Fluorescence induite

Constante optique

Intensité laser

Volume de collection

$I_{\text{fluor}}(\lambda) = K_{\text{opt}}(\lambda) K_{\text{exc}}(\lambda) I_0 C_0 V_c e^{-\tau}$

Intensité de fluorescence

Constante spectroscopique

Concentration en traceur

Dépendance en température

Deux couleurs → deux bandes spectrales :

→ Intensité relative :

$\frac{I_{\text{fluor}}(\lambda_1)}{I_{\text{fluor}}(\lambda_2)} = \frac{K_{\text{opt}}(\lambda_1) K_{\text{exc}}(\lambda_1) I_0 C_0 V_c e^{-\tau_1}}{K_{\text{opt}}(\lambda_2) K_{\text{exc}}(\lambda_2) I_0 C_0 V_c e^{-\tau_2}}$

Un étalonnage et une prise de référence pour R_f :

$R_f = K_e \frac{A_{\text{fluor}}}{A_{\text{ref}}} \rightarrow R_f = \left(\frac{K_{\text{opt}}(\lambda_1)}{K_{\text{opt}}(\lambda_2)} \right) \left(\frac{K_{\text{exc}}(\lambda_1)}{K_{\text{exc}}(\lambda_2)} \right) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$

Estimation du flux de refroidissement par méthode inverse

Problématique

Température chauffage

en face arrière connue

Estimation du flux de refroidissement

Connaissance de l'émissivité du matériau pour une bonne calibration

Rayonnement provenant de la scène thermique

Caméra Rapide

Luminance

Transcription en température

Thermogrammes

Formulation mathématique

Champ de température : régime du laboratoire

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$

et conditions limites

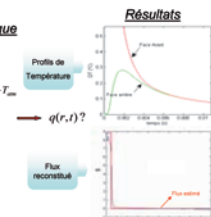
$T = T_{\text{paroi}} = T_{\text{amb}}$

$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_{\text{ref}}(T - T_{\text{ref}})$ en $x = e$

$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q(r, t) + h_{\text{ref}}(T - T_{\text{ref}})$ en $y = 0$

$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ en $z = R$

Condition initiale : $T(r, t = 0) = 0$



Modélisation et Simulation au LEIDC

NEPTUNE CMFD

Code de thermohydraulique locale (échelle ~ mm), développé en collaboration entre le CEA, EDF, AREVA NP et l'IRSN dans le cadre d'un projet lancé en 2001

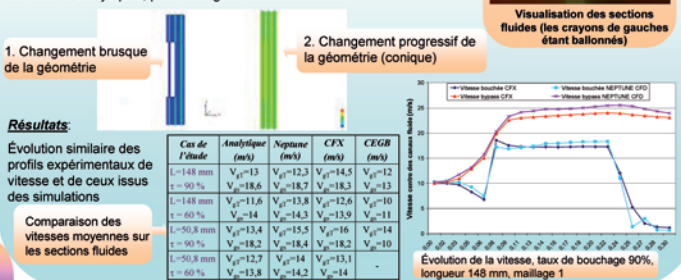
- Simulation d'écoulements multi-fluides, résolution de trois équations de conservation par fluide ou champ (masse, quantité de mouvement et énergie),
- Approche Eulerienne moyennée en espace et en temps, un seul champ de pression,
- Discretisation en volume finis avec arrangement co-localisé des variables.

Simulation d'un écoulement monophasique en géométrie APRP

Objectif : valider l'écoulement calculé avec le code Neptune CFD vis à vis :

- ✓ du taux de bouchage (61 % ou 90 %)
- ✓ de la longueur du bouchage (148 mm ou 50,8 mm)

Réalisation : Résultats des simulations Neptune CMFD sur l'expérience CEGB comparés aux résultats expérimentaux, aux résultats du code CFX et à des évaluations analytiques, pour deux géométries différentes :



Implantation de la modélisation des transferts de chaleur en paroi dans le code

• Validation de cette modélisation sur un cas simple d'impact de spray sur une paroi chaude, résultats expérimentaux du LEMTA

• Simulation d'un cas complexe du refroidissement des gainages ballonnés

➢ Modélisations nécessaires de phénomènes physiques

- ✓ rayonnement
- ✓ conduction dans la paroi en géométrie complexe
- ✓ turbulence influençant la fragmentation des gouttes et les transferts thermiques
- Validation sur des données expérimentales (CEGB, RBHT)
- Perspectives : modélisation de la polydispersion en taille de gouttes

Couche de vapeur

Paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

Simulation de l'impact de spray sur une paroi chaude

