



Simulation des écoulements eau/vapeur dans un réacteur nucléaire

Les écoulements à bulles : un problème de taille !

Pierre Ruyer (Post-Doctorant), Nathalie Seiler, Georges Repetto*, Catherine Colin**

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

** Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

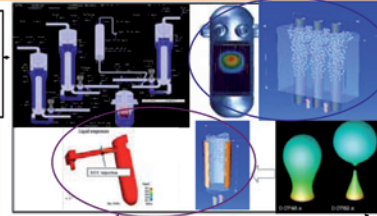
La Direction de Prévention des Accidents Majeurs de l'IRSN

- contribue à l'expertise des codes de thermohydraulique utilisés pour les dossiers de sûreté et au développement de nouvelles méthodologies,
- réalise des études en vue de préciser et anticiper des besoins en R&D.

Les récentes avancées concernant la **compréhension des écoulements polyphasiques** et le développement de méthodes numériques ont permis la mise au point, de codes de **calculs de thermohydraulique performants**. Ils constituent, aujourd'hui, des outils incontournables de dimensionnement des réacteurs nucléaires.

Des progrès restent à réaliser afin d'étendre la validité des codes à un plus grand nombre de configurations d'écoulements. Ainsi, le LEIDC de l'IRSN collabore avec l'IMFT sur l'utilisation de la **méthode des moments pour la prédiction de l'aire interfaciale** (grandeur faisant intervenir la taille et le taux de présence des bulles) dans les modèles. La formulation de cette méthode est réalisée afin de simuler la polydispersion en taille au sein d'un écoulement à bulles à l'aide du code Neptune-CMFD.

Echelle système :
simulation globale des circuits du réacteur



Echelle composant :
(ou CFD dans un milieu poreux) : les crayons et les tubes d'assemblage sont homogénéisés et pris en compte en tant que porosité.

Echelle locale (Computational Multi-Fluid Dynamics - CMFD) :

Description plus fine que l'échelle composant incluant différents modèles (notamment de turbulence) permettant des analyses locales.

Direct Numerical Simulation (DNS) :
simulation locale sur des très petits domaines.

Aide à la compréhension des structures d'écoulement et à la modélisation aux échelles supérieures

Échelles de simulation de la plate-forme NEPTUNE : Nouvel Environnement Partagé de Thermohydraulique Nucléaire



NEPTUNE CMFD

Code de thermohydraulique locale (échelle ~ mm), développé conjointement par 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 bilan par fluide ou champ (masse, quantité de mouvement et énergie),
- Approche Eulérienne moyennée en espace et en temps, modèle à deux fluides, un seul champ de pression,
- Discrétisation en volume finis avec arrangement co-localisé des variables.

Motivations

Preuves expérimentales que, statistiquement, différentes tailles de bulles peuvent localement co-exister. Jusqu'à présent, une taille de bulle unique dans l'écoulement :

- mauvaise prise en compte de la variation de taille suite à l'évaporation, la condensation, la coalescence ou la fragmentation de bulles
- impossibilité de reproduire la répartition des bulles dans l'écoulement et les effets, dépendants de la taille des bulles, de l'écoulement sur la bulle (la force de portance entraîne les grosses bulles au cœur de l'écoulement et les petites en paroi).

Objectif

Caractériser les différentes tailles de bulles afin d'améliorer les modèles des transferts de masse, quantité de mouvement et énergie aux interfaces liquide/vapeur des bulles → prédictions plus réalistes des écoulements.

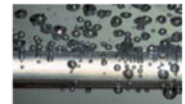
Méthode

Différentes méthodes existent : le bilan de population (modèle MUSIG dans CFX) et la méthode des moments.

Représentation **discrète** de la fonction de distribution : classes regroupant les bulles par intervalle de taille une équation de transport par classe de taille de bulles supplémentaire, termes source de changement de classe.

Représentation **continue** de la fonction de distribution : via une fonction approchée, une seule équation de transport de l'inverse de la masse d'une bulle supplémentaire, termes source de coalescence, rupture, condensation et évaporation...

Choix de la **méthode des moments** car c'est une méthode performante sans augmentation importante du coût de calcul.



Résultats expérimentaux

L'expérience 'TOPFLOW avec obstacle'

- aspect tri-dimensionnel
- mesures fines de la structure locale des écoulements à bulles

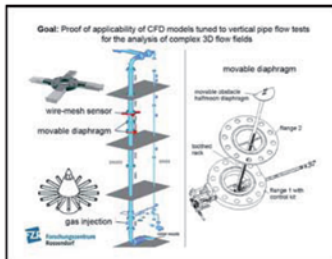


Schéma de principe de la boucle, de l'instrumentation et de l'obstacle

Cas test 074

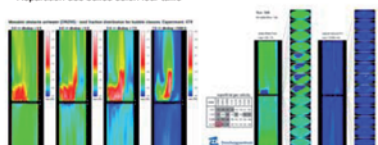
$J=1.017 \text{ m/s}$, $J_v=0.0368 \text{ m/s}$

- ✓ Aval de l'obstacle : zone d'accumulation de vapeur,
- ✓ Existence de 2 zones de re-circulation contra-rotatives,
- ✓ Répartition des bulles selon leur taille

Cas test 069

$J=0.102 \text{ m/s}$, $J_v=0.0368 \text{ m/s}$

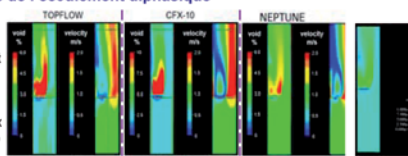
- ✓ Faible zone d'accumulation de vapeur (fine couronne entourant l'obstacle),
- ✓ Taux de vide moyen plus important,
- ✓ Structure différente de l'écoulement



Structure de l'écoulement diphasique

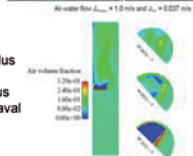
Cas test 074

Cartes des taux de vide et des vitesses liquide, (résultats expérimentaux et simulations)



Cas test 069

Taux de vide plus fort autour de l'obstacle et plus faible juste en aval



Première conclusion

Simulation correcte des principales structures de l'écoulement même avec l'hypothèse de monodispersion

Polydispersion sans rupture

Caractéristiques des simulations

Maillage

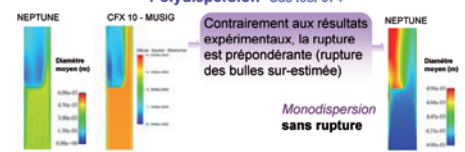
- domaine : 1m de hauteur, 1/2 tube,
- ~ 150 000 éléments (maillage non structuré),
- Raffinement de la couche limite radiale (0,1 mm)

Modèles physiques

- Profils de vitesse plats en entrée, pression imposée en sortie,
- Forces sur les bulles : Trainée, Masse Ajoutée, Portance,
- Modèles de turbulence : k-ε (liquide), corrélation de Tchen (bulles)
- Caractérisation de la **dispersion en taille** :
 - ✓ Monodispersion globale d=4 mm,
 - ✓ Monodispersion locale + aire interfaciale (Yao & Morel),
 - ✓ Polydispersion (loi quadratique).

Résultats des simulations : IRSN/LEIDC

Polydispersion Cas test 074



Monodispersion locale : rupture et coalescence (Yao 2004)

Polydispersion sans rupture

Seconde conclusion

Amélioration de la prédiction du diamètre des bulles, bien que légèrement sous-estimé. Possible prise en compte d'un mécanisme additionnel de collision (Prince 1990)

Conclusion

- Développement d'un modèle de polydispersion en taille avec un nombre réduit de variables,
- Relations de fermetures cohérentes: hydrodynamique des bulles et rupture/coalescence,
- Implémentation dans Neptune-CMFD → Amélioration des simulations des expériences TOPFLOW avec obstacle.

Perspectives

- Application aux écoulements avec **changement de phase** (écoulements bouillants),
- Sensibilité à la **forme de la probabilité de présence**,
- Adaptation à un modèle de **polydispersion en vitesse**.

NOTES