

Problème standard international n° 47 sur la thermohydraulique de l'enceinte de confinement

H. J. Allelein, K. Fischer, J. Vendel, J. Malet, E. Studer, S. Schwarz, M. Houkema, H. Paillère, A. Bentaib*

En organisant le Problème standard international n° 47 (PSI-47), l'OCDE/AEN souhaitait évaluer les capacités des codes 0D et des codes de mécanique des fluides numérique (*computational fluid dynamics* – CFD) pour l'étude de la thermohydraulique de l'enceinte de confinement. Conformément aux recommandations du «*State-of-the-art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution*», des données expérimentales provenant d'installations expérimentales complémentaires ont été utilisées pour les analyses comparatives présentant des problèmes de modélisation de difficulté croissante. Les trois installations en question TOSQAN, MISTRA ET ThAI ont fourni des données expérimentales de grande qualité adaptées aux comparaisons de codes 0D et de codes de CFD en régimes permanent ou transitoire.

Le programme du PSI-47 s'est achevé en 2007. Dix-neuf organisations de quatorze pays y ont apporté leur contribution : résultats expérimentaux, analyses effectuées avec douze codes différents et examens. Le rapport final sur ce programme qui contient un éventail complet de figures et les résultats détaillés, peut être consulté en ligne à l'adresse www.nea.fr/html/nsd/docs/2007/csni-r2007-10.pdf.

Expériences et benchmarks

Le programme de travail du PSI-47 s'est déroulé en deux étapes :

- La première étape était consacrée à la validation des codes à l'aide de données obtenues dans l'installation d'essais analytiques TOSQAN (volume de 7 m³) et l'installation à plus grande

échelle MISTRA (volume de 100 m³). Les essais effectués sur TOSQAN étaient consacrés à l'étude de la condensation en paroi, de l'injection de vapeur dans l'air ou dans des atmosphères constituées d'air et d'hélium et de la flottabilité dans des conditions initiales bien contrôlées et une géométrie simple. Les interactions entre phénomènes tels que la condensation et la stratification, la turbulence et la flottabilité ont été testées sur MISTRA. Les installations MISTRA et TOSQAN étaient toutes deux conçues spécifiquement pour produire des données à injecter dans les codes de CFD grâce à une instrumentation des plus modernes. Les calculs de comparaison de codes sur TOSQAN ont été effectués « en ouvert » tandis que le benchmark sur MISTRA a été réalisé en aveugle.

- La deuxième étape consistait à valider les codes sur une expérience effectuée dans l'installation multi-compartiments ThAI (volume de 60 m³) et caractérisée par différentes phases d'injection

* H. J. Allelein (*Hans-Josef.Allelein@grs.de*) et S. Schwarz (*Siegfried.Schwarz@grs.de*) travaillent à la *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit in Allemagne* ; K. Fischer (*fischer@becker-technologies.com*) travaille à la *Becker Technologies GmbH en Allemagne* ; J. Vendel (*jacques.vendel@irsn.fr*), J. Malet (*jeanne.malet@irsn.fr*) et A. Bentaib (*ahmed.bentaib@irsn.fr*), travaillent à l'*IRSN en France* ; E. Studer (*etienne.studer@cea.fr*) et H. Paillère (*henri.paillere@cea.fr*) travaillent au *CEA en France* ; et M. Houkema (*houkema@nrg-nl.com*) travaille à *NRG aux Pays-Bas*.

de vapeur et d'hélium, des conditions transitoires de stratification et de mélange dans l'atmosphère, l'établissement de la convection naturelle, la répartition des condensats sur la paroi, la formation de brouillard et le comportement thermique transitoire des parois conductrices. Cette expérience a permis d'acquérir des données de mesure détaillées sur les champs de vitesse, de température et de concentration des gaz utilisables pour la validation des codes. Le benchmark sur les expériences ThAI recouvrait trois séries de calculs effectués respectivement en aveugle, en semi-aveugle et « en ouvert ».

Résultats

Les trois installations expérimentales ont fourni des données d'expérience d'excellente qualité, avec des techniques de mesures très précises et bien adaptées aux comparaisons de codes de CFD et de codes 0D en régimes permanent et transitoire. Outre des mesures de pression et de température de l'atmosphère, on a pu obtenir pour la première fois des mesures détaillées de la vitesse et de la concentration des gaz (air, vapeur et hélium).

Concernant la première étape, le benchmark ouvert sur les essais TOSQAN révèle que les prévisions concordent généralement bien avec les résultats d'expérimentaux obtenus en régime de condensation permanent. Les modèles ne parviennent pas toutefois à reproduire toujours certains phénomènes transitoires importants. Certains modèles multidimensionnels reproduisent la cinétique de la stratification transitoire tandis que la plupart de codes 0D ne donnent que la concentration finale.

Au cours du benchmark effectué en aveugle sur les données d'essai MISTRA, les codes 0D qui normalement intègrent la modélisation des brouillards fournissent des résultats corrects à condition que le maillage permette de représenter les principales caractéristiques du schéma d'écoulement. Les calculs de CFD fournis ont révélé des questions concernant la simulation d'un jet ascendant et le comportement thermique de la paroi de la cuve en acier. Tous les codes donnent des valeurs moyennes correctes telles que la pression totale. Certains calculs reproduisent bien les profils de température des gaz, d'autres affichent d'importants écarts dus principalement à une exagération de la surchauffe. Cette exagération n'a heureusement que des effets mineurs sur les concentrations calculées d'hélium, généralement bien simulées.

Au cours de la phase 2 consacrée au benchmark sur ThAI, plusieurs participants sont parve-

nus à améliorer nettement les prévisions des calculs réalisés en semi-aveugle par rapport aux calculs effectués en aveugle par le simple fait d'affiner le maillage et de traiter de manière plus systématique le phénomène d'entraînement par le jet. Notamment, plusieurs modèles 0D reproduisent bien les stratifications atmosphériques qui se produisent lorsque l'injection s'effectue à l'intérieur du nuage de gaz léger en partie supérieure. Ces phénomènes sont en général sous-estimés par la plupart des calculs effectués avec des codes 0D et les codes de CFD. Dans la plupart des cas, ces deux types de codes ne parviennent pas à reproduire les conditions très complexes de maintien de la stratification lorsque l'injection de vapeur s'effectue par le piquage inférieur. Les raisons pour lesquelles deux codes 0D sont parvenus à prévoir cette stratification en aveugle tiennent au maillage et à la simulation du phénomène d'entraînement.

Conclusions et recommandations

Compte tenu de l'excellente qualité des essais PSI-47, il est recommandé de valider les codes de calcul de l'enceinte sur ces essais avant de les utiliser pour évaluer la répartition de l'hydrogène dans les applications à des centrales. Ces recommandations valent pour les codes 0D comme pour les codes de CFD employés dans la recherche et l'industrie nucléaires.

À l'évidence, les modèles 0D sont aujourd'hui le principal outil d'analyse générale de la thermohydraulique de l'enceinte de confinement. Ils consomment nettement moins de temps de calcul que les codes de CFD et sont donc adaptés aux analyses paramétriques et aux EPS de niveau 2. Ces codes 0D présentent cependant quelques faiblesses qui tiennent au modèle d'écoulement simplifié qui est appliqué. Apparemment, l'utilisateur est en mesure de surmonter cet inconvénient par une modélisation appropriée qui tient compte des phénomènes pertinents attendus : c'est ainsi que les meilleurs résultats de l'étape 2 ont été obtenus par deux codes 0D.

Pour évaluer la sûreté des enceintes de REP vis-à-vis du risque d'explosion d'hydrogène, on recommande donc d'associer les deux types de codes, codes 0D et codes de CFD. Les codes 0D peuvent servir d'outil de base pour les analyses de l'enceinte tandis que les codes de CFD seront utilisés pour calculer :

- des scénarios d'accidents exigeant une analyse plus détaillée des phénomènes locaux ;
- des scénarios d'accidents critiques difficiles à analyser à l'aide des codes 0D à cause de leurs limitations inhérentes.

En revanche, l'effet utilisateur est à l'origine d'une forte dispersion des résultats des calculs effectués avec les codes 0D. Ces codes peuvent ainsi donner les meilleurs comme les pires résultats. L'effet utilisateur se fait sentir surtout au niveau du maillage.

Forts de l'expérience acquise dans le cadre de ce programme, notamment sur les codes 0D, nous recommandons de lancer une activité internationale pour élaborer des consignes générales (concernant notamment le maillage) d'usage des codes 0D contenant des recommandations particulières pour les modes d'emploi. Dans le cas des codes de CFD, on recommande d'améliorer encore la modélisation de la condensation et de la turbulence, en particulier le traitement des parois au cours de ces deux phénomènes.

Les essais réalisés dans le cadre du PSI-47 constituent une bonne base de données pour affiner les codes. Les données expérimentales sont encore rares cependant sur certains phénomènes. Les analystes doivent préciser les données dont ils ont besoin pour concevoir de nouveaux essais.

À l'heure actuelle, il n'a pas été proposé d'entreprendre un nouveau programme de comparaison de codes de calcul de thermohydraulique de l'enceinte. La situation pourrait changer à l'issue de nouvelles analyses des essais PSI-47 et après la réalisation du PSI envisagé sur la combustion de l'hydrogène. Le passage de l'échelle des essais aux applications à des centrales réelles reste un problème majeur. Un benchmark sur une application en centrale s'imposerait par conséquent pour étudier, entre autres, les effets du maillage et l'impact de l'injection de vapeur et de gaz léger dans une enceinte de confinement standard (et probablement simplifiée) d'un réacteur à eau pressurisée. ■

Références

1. AEN (1999), «*State-of-the-art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution*», NEA/CSNI/R(99)16, OCDE, Paris.
2. AEN (2007), «*International Standard Problem ISP-47 on Containment Thermal-hydraulics*», NEA/CSNI(2007)10, OCDE, Paris.

Nouvelles brèves

Progrès du Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP)

Comme nous l'avions évoqué dans un précédent numéro de *AEN Infos*¹, l'AEN a été choisie pour assurer le Secrétariat technique de la deuxième étape du Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP). Cette activité a été lancée afin de mutualiser les ressources et les connaissances des autorités de sûreté nationales pour l'évaluation de nouvelles filières de réacteurs et ainsi d'améliorer l'efficacité et l'efficacité du

processus. Bien que la dimension internationale du projet soit un de ses atouts, le MDEP repose sur le principe que les autorités de sûreté nationales conservent la maîtrise de la délivrance des autorisations et de toutes les décisions réglementaires.

La deuxième étape du MDEP a pour objectifs une meilleure coopération multinationale et l'harmonisation des codes, normes et objectifs de sûreté. Cela suppose, entre autres, de rapprocher