

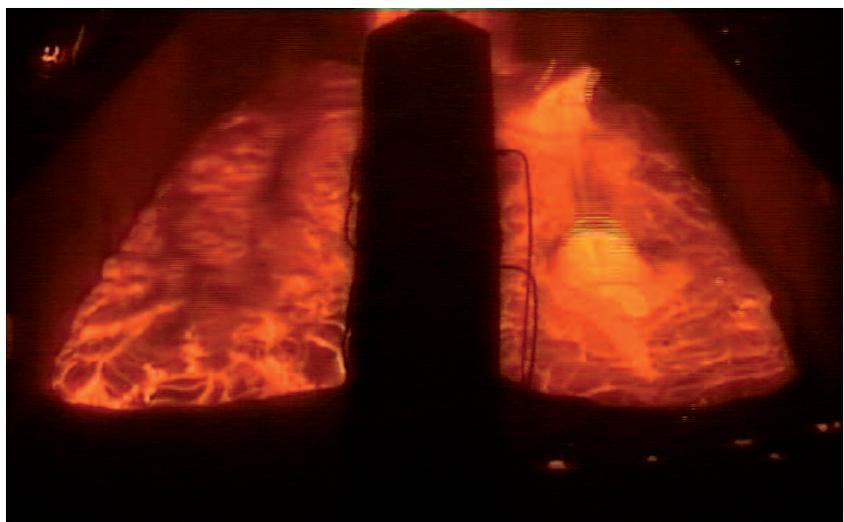
5.2

Étalement du corium

Modélisation et études de sûreté relatives au récupérateur de corium du réacteur EPR

Fabrice BABIK, Michel CRANGA,
Jean-Claude LATCHÉ, Bénédicte MICHEL,
Bruno PIAR, Didier VOLA
Laboratoire de mathématiques
appliquées et de la physique du corium

Le réacteur à eau sous pression de nouvelle génération EPR est doté d'un dispositif de sécurité innovant, le récupérateur de corium. Ce compartiment de près de 200 m² de surface au sol doit permettre de recueillir le corium en cas de percée de la cuve lors d'un accident avec fusion du cœur, sous forme d'une couche suffisamment mince pour que son refroidissement puisse être assuré. On comprend dans ces conditions l'importance que revêt la faculté de prédire de manière fiable l'étalement du corium dans le récupérateur sous son propre poids, en fonction notamment de sa température initiale et du débit de déversement. Ce sujet a fait l'objet d'un programme de modélisation mené à l'IRSN qui s'est concrétisé par le développement du logiciel CROCO, validé par comparaison aux résultats fournis principalement par les expériences CORINE, KATS et VULCANO [1]. La description de ce programme fait l'objet des trois premières parties du présent article. Les études menées à l'IRSN pour analyser le comportement du récupérateur sont succinctement évoquées dans la quatrième et dernière section.



Expérience VEU7 : coulée du corium sur un substrat céramique (à gauche) et sur un substrat béton (à droite).

Modélisation physique de l'étalement

L'étalement du corium constitue un écoulement extrêmement complexe, siège de phénomènes physiques couplés dont les principaux sont la solidification en surface due aux échanges par rayonnement, l'érosion du substrat (béton), les réactions chimiques entre composés du corium et du béton. La montée en température puis l'érosion du béton conduisent en outre à des dégagements de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone qui traversent la coulée.

Pour modéliser cet écoulement, le choix effectué consiste à traiter de manière séparée deux ensembles de phases. Le premier rassemble dans un *continuum* équivalent les phases liquides et solides du corium la phase gazeuse dispersée est isolée dans le second. Pour cette dernière, les bilans de quantité de mouvement et d'énergie sont simplifiés, en négligeant les termes d'inertie.

Pour en développer le modèle décrivant le comportement de « la phase corium », il est nécessaire de procéder en plusieurs étapes [2] :

- Le point de départ est l'établissement d'un modèle local pour un écoulement incompressible réactif à plusieurs constituants. Des constituants élémentaires de diffusivité massique identique sont regroupés dans des entités appelées macrocomposants, dont les équations de transport sont traitées. Les réactions chimiques sont ensuite prises en compte en faisant l'hypothèse d'équilibre thermodynamique. Les termes de réaction dans l'équation d'énergie disparaissent alors au profit d'une évaluation de l'enthalpie en fonction de la composition. Pour ce dernier point, un outil externe exploitant une base de données thermodynamiques (base NUCLEA) développée avec le CNRS (laboratoire THERMA à Grenoble) [3] est utilisé.
- La formulation des équations de bilan pour le mélange liquide-solide par la technique de prise de moyenne permet, moyennant en particulier

l'hypothèse d'égalité des vitesses des phases, d'écrire les contraintes à l'échelle macroscopique sous la forme usuelle pour un liquide newtonien. Apparaît alors une viscosité effective qui doit être calculée par des corrélations empiriques tirées de la littérature. Par généralisation, des lois de comportement effectives non newtoniennes sont également envisagées.

■ Enfin, deux types de fluctuations à l'échelle microscopique doivent être traités : la turbulence, au sens usuel du terme, et les perturbations liées à la traversée de l'écoulement par les bulles gazeuses. Ces deux phénomènes sont pris en compte simplement en supposant qu'ils se traduisent par des diffusions additionnelles comme la masse, l'énergie et la quantité de mouvement qui sont évaluées par des relations empiriques. Pour la turbulence, on parle alors de « fermeture algébrique ».

Le modèle ainsi obtenu est complexe à traiter sur le plan numérique : il inclut en effet les équations de Navier-Stokes. De plus, la caractéristique géométrique de l'écoulement, à savoir sa dimension verticale petite devant les dimensions horizontales, conduit à des maillages très étirés. Cette dernière caractéristique est mise à profit : une analyse asymptotique en fonction du rapport entre dimensions horizontales et verticales des termes dans chacune des équations de conservation montre que certains d'entre eux sont négligeables. Leur suppression permet un calcul direct de la pression (la pression dynamique est prise égale à la pression hydrostatique) et, *in fine*, un découplage des équations de quantité de mouvement qui simplifie notablement la résolution. Les bilans de masse et d'énergie restent inchangés. Les deux systèmes d'équations, Navier-Stokes et le modèle simplifié, sont traités dans le logiciel de simulation développé à cet effet, le code CROCO. Les calculs montrent que le modèle simplifié donne des résultats sensiblement identiques au modèle complet pour des temps de calculs très inférieurs dès lors que le rapport entre dimensions horizontales et verticales est inférieur à 0,1.

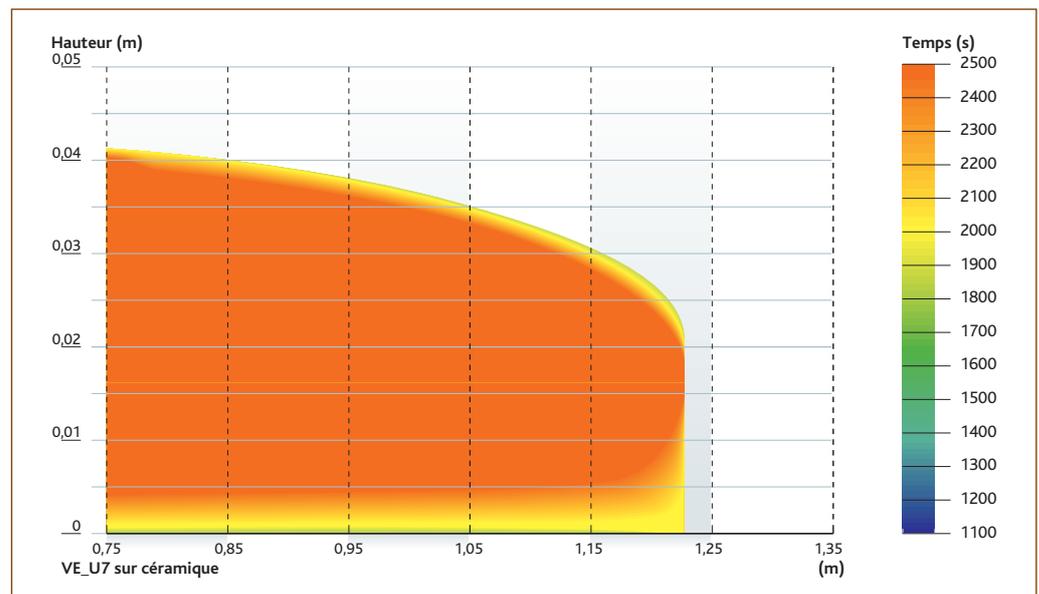


Figure 1 : Expérience VE_U7 : coulée sur substrat céramique. Distribution des températures dans le corium calculée par le code CROCO.

Résolution numérique

De manière générale, la résolution numérique des problèmes à surface libre est difficile. Ce problème est encore compliqué pour la simulation de l'étalement du corium par les fortes variations du domaine occupé par le fluide, ainsi que par la présence de couches limites à la surface, du fait des échanges par rayonnement avec l'atmosphère. Le premier aspect conduit à privilégier une discrétisation spatiale s'appuyant sur un maillage fixe.

Le schéma numérique doit alors répondre à deux contraintes :

- fournir une discrétisation naturelle des dérivées en fonction du temps, notamment dans les zones du maillage où le fluide était absent au pas de temps précédent, et où, en conséquence, une formule de différences finies usuelle n'a pas de sens ;
- conserver une précision optimale au voisinage de la surface libre.

Le problème ainsi posé nécessite le développement d'une méthode numérique originale [4], de type transport-Galerkin, dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- la surface libre est discrétisée indépendamment du maillage et transportée par une méthode lagrangienne ;
- la marche en temps est basée sur un découplage des opérateurs mathématiques en un opérateur de transport et un opérateur de diffusion ;
- le transport est traité par la méthode des caractéristiques ;
- l'étape de diffusion est discrétisée par une technique de Galerkin, où les espaces d'approximation sont les espaces éléments finis associés au maillage et les intégrations volumiques sont réalisées sur le domaine fluide, i.e. limité par la surface libre discrète.

L'utilisation de lois de comportement non newtoniennes dans l'étape de diffusion a donné lieu à des développements spécifiques [5, 6].

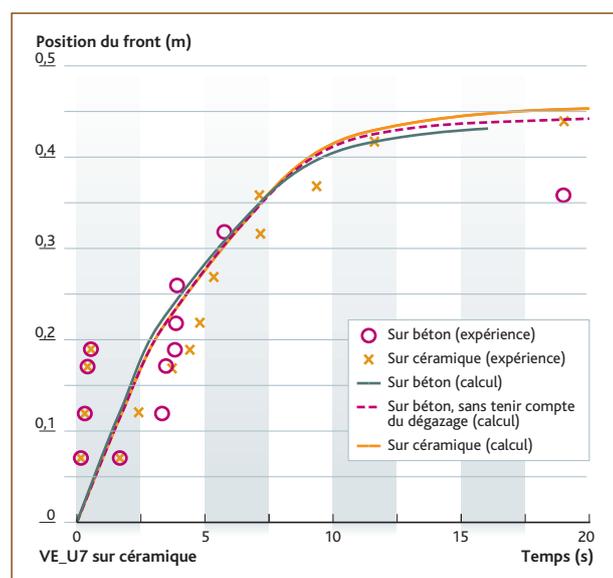


Figure 2 : Expérience VEU7 : coulée sur substrats céramique et béton. Avancée du corium en fonction du temps, mesurée et calculée par CROCO.

Vérification et validation

La première étape après le développement d'un code ou d'une partie de code consiste à vérifier les équations du modèle mathématique. La solution est connue pour un certain nombre de cas simplifiés comme le problème de conduction, d'advection-diffusion et les équations de Navier-Stokes. Cette solution est établie soit de manière analytique, soit par des calculs de référence de la littérature internationale. En outre, des solutions approchées sont disponibles pour des transitoires d'étalement dans des régimes d'écoulement extrêmes :

- à nombre de Reynolds nul, des solutions autosemblables valables asymptotiquement pour des temps longs peuvent être explicitement calculées, pour des écoulements plans ou axisymétriques, à masse totale constante ou variable (débit d'entrée constant, par exemple) ;
- pour les écoulements plans peu visqueux, l'évolution de la surface libre et du débit traversant une section verticale peut être obtenue pour des conditions initiales bien particulières, en résolvant analytiquement les équations de Saint-Venant.

Le code CROCO a été confronté avec succès à l'ensemble de ces problèmes tests.

L'étape de validation consiste ensuite à vérifier que le modèle physique représente correctement la réalité. Pour l'étalement du corium, les interrogations portent essentiellement :

- sur l'hypothèse d'égalité des vitesses des phases liquides et solides (absence de macroségrégation) ;
- sur les lois de fermeture empiriques pour la viscosité effective dans les zones partiellement fondues et les diffusions turbulentes, notamment celle due à la traversée de l'écoulement par un flux de bulles.

Cela conduit en toute logique à la matrice de validation suivante :

- En premier lieu, le code est confronté à des expériences analytiques, avec solidification et sans gaz, où les variables physiques de l'écoulement peuvent être précisément caractérisées. C'est l'objet des premières séries d'expériences du programme CORINE, mené pour l'IRSN par le CEA/DEN de Grenoble [7]. Le simulant du corium se solidifie au contact du support. Les variations de la température en fonction du temps et de la hauteur (un point de mesure chaque millimètre) sont mesurées en certains lieux de l'écoulement. Les expériences KATS, menées au Fzk⁽¹⁾ [8], prolongent cette étude dans la mesure où le simulant utilisé, la thermitte, n'est liquide qu'à haute température, ce qui permet d'observer une solidification en surface due aux échanges par rayonnement. La comparaison des distributions de températures obtenues lors des essais CORINE et KATS fait apparaître que ces écoulements appartiennent à deux régimes distincts. Dans les expériences CORINE, les temps caractéristiques de l'hydrodynamique sont longs devant ceux de la thermique et les surfaces isothermes sont presque verticales. Ces temps se comparent de manière inverse dans les essais

(1) Fzk : Forschungszentrum Karlsruhe - Institut allemand des techniques de l'énergie du nucléaire et centre de recherche de Karlsruhe.

KATS et le refroidissement se traduit par l'apparition de couches limites thermiques en surface et au contact du support. Le premier régime se retrouve dans le cas du réacteur pour un étalement sur un support en matériau réfractaire, le second pour un étalement à faible débit sur du béton, où la diffusion de la chaleur est fortement favorisée par le bullage.

- En second lieu, dans une démarche similaire, les corrélations de diffusion turbulente sont validées par comparaison avec les séries d'expériences CORINE avec bullage, en présence ou non de solidification, puis avec les tests d'étalement KATS sur un substrat en béton.

- Enfin, le programme expérimental VULCANO, où le matériau utilisé est de même composition que le corium et où le substrat est constitué tantôt de zircone, tantôt de béton, rassemble des expériences où tous les phénomènes sont présents. Il permet ainsi une confirmation globale de la modélisation. On trouvera sur les *figures 1 et 2 (page 10 et 11)* un exemple d'expérience et de calcul.

L'ensemble des expériences confirme l'absence de macroségrégation entre les phases liquide et solide ; compte tenu du fait que l'occurrence de ce phénomène dépend de propriétés thermophysiques souvent mal caractérisées (diffusions massiques dans un écoulement à plusieurs constituants), cette conclusion est fortement renforcée par la présence dans la matrice d'essais d'expériences en matériaux réels.

Au terme de ces processus de vérification et validation (cf. [7] pour une synthèse partielle), le code CROCO est considéré comme valide pour des études de sûreté.

Les études relatives au récupérateur de corium du réacteur EPR

Le confinement du corium dans l'enceinte du réacteur EPR est potentiellement obtenu au terme d'un scénario qui comporte plusieurs étapes. Dans un premier temps, le corium est retenu dans le puits de cuve. Il en érode le sol en béton, puis la plaque d'acier séparant le puits de cuve de la chambre d'étalement. Lorsque cette plaque se perce, le corium s'écoule dans le récupérateur. Il atteint alors des détecteurs déclenchant

le déversement d'une réserve d'eau dans le système de refroidissement. Les canaux situés sous le sol du récupérateur sont inondés en premier. L'eau atteint ensuite la surface du corium, quelques minutes après le contact entre le corium et les détecteurs. L'étalement du corium sous eau ne pouvant pas être garanti, il est primordial que celui-ci ait eu lieu avant cet instant. Cette question a fait l'objet d'études, dont les résultats sont succinctement présentés ici.

En premier lieu, il est démontré qu'un étalement complet n'est possible que si la brèche ouverte par le corium dans la plaque en acier a une surface minimale. Pour ce faire, la relation entre la valeur de cette surface et le débit de déversement du corium est déterminée par un modèle analytique simple basé sur l'équation de Bernoulli. Une première série de calculs d'étalement réalisés à l'aide du code CROCO V2 permet ensuite de montrer que les détecteurs, où qu'ils soient placés, peuvent être atteints par le front de corium en un temps beaucoup plus court que la durée de déversement. Par exemple, dans le cas d'une brèche d'un diamètre équivalent de 20 cm seulement, le front d'étalement peut atteindre l'extrémité du récupérateur en moins d'une minute. Il est donc impossible de tabler sur un délai significatif entre le début du déversement et l'atteinte des capteurs. Le déversement du corium sur le récupérateur doit être plus court que la montée d'eau dans le dispositif de refroidissement, et cette contrainte fixe la surface minimale de brèche dans la plaque en acier.

Dans une seconde série de calculs, on vérifie que l'étalement du corium est assuré pour la surface de brèche minimale déterminée précédemment. Cette étude tient compte d'hypothèses pénalisantes. On considère en particulier des valeurs de température initiale auxquelles le corium est seulement partiellement fondu et, en conséquence, très visqueux. Le front de corium atteint néanmoins l'extrémité de la chambre d'étalement en quelques minutes.

Cette étude conclut au bon fonctionnement du récupérateur, pourvu que le débit de déversement du corium dans le récupérateur soit suffisant, ce qui n'est obtenu que si l'érosion par le corium de la plaque d'acier séparant le puits de cuve du récupérateur conduit à l'ouverture d'une brèche de taille suffisante.

Références

- [1] C. Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J.F. Haquet, C. Jégou, P. Piluso, J. Monerris. Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 223, pp. 75-102, 2003.
- [2] B. Piar, B.D. Michel, F. Babik, J.C. Latché, G. Guillard, J.M. Ruggieri. CROCO: a computer code for corium spreading. 9th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 9), San-Francisco, 1999.
- [3] M. Barrachin, M. Salay, F. Fichot. The use of a thermochemical database to model stratification in a molten pool during a severe accident. STNM11, Karlsruhe, 2004.
- [4] D. Vola, F. Babik, J.C. Latché. On an numerical strategy to compute gravity currents of non-Newtonian fluids. *Journal of Computational Physics*, vol. 201, pp. 397-420, 2004.
- [5] D. Vola, L. Boscardin, J.C. Latché. Laminar unsteady flows of Bingham fluids: a numerical strategy and some benchmark results. *Journal of Computational Physics*, vol. 187, pp. 441-456, 2003.
- [6] J.C. Latché, D. Vola. Analysis of the Brezzi-Pitkaranta stabilized scheme for creeping flows of Bingham fluids. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 42, pp. 1208-1225, 2004.
- [7] B.D. Michel, B. Piar, F. Babik, J.C. Latché, G. Guillard, C. de Pascale. Synthesis of the validation of the CROCO V1 spreading code. OECD Workshop « Ex-Vessel Debris Coolability », Karlsruhe, Nov. 1999.
- [8] H. Alsmeyer, G. Albrecht, G. Fieg, U. Stegmaier, W. Tromm, H. Werle. Controlling and cooling core melts outside the pressure vessel. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 202, pp. 269-278, 2000.