



HAL
open science

Sûreté des réacteurs : la connaissance du risque hydrogène enrichie de 20 ans de recherche et développements

Etienne Studer, Abdo Danièle, Benteboula Sonia, Bernard-Michel Gilles,
Coulon Nadia, Dabbene Frédéric, Kudriakov Sergey, Magnaud Jean-Paul,
Norvez Olivier, Tomassian Régis, et al.

► To cite this version:

Etienne Studer, Abdo Danièle, Benteboula Sonia, Bernard-Michel Gilles, Coulon Nadia, et al.. Sûreté des réacteurs : la connaissance du risque hydrogène enrichie de 20 ans de recherche et développements. Revue Générale Nucléaire, 2018, 1, pp.48-53. 10.1051/rgn/20181048 . cea-02339835

HAL Id: cea-02339835

<https://cea.hal.science/cea-02339835v1>

Submitted on 5 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« Sûreté des réacteurs : la connaissance du risque hydrogène enrichie de 20 ans de recherche et développements en expérimental et simulation »

Etienne Studer, Danièle Abdo, Sonia Benteboula, Gilles Bernard-Michel, Nadia Coulon, Frédéric Dabbene, Sergey Kudriakov, Jean-Paul Magnaud, Olivier Norvez, Régis Tomassian, Jean-Luc Widloecher, Alberto Beccantini, Stéphane Gounand, Jérôme Brinster, CEA

Ahmed Bentaib, IRSN

Serge Guieu, Namane Mechitoua, EDF

1 CONTEXTE

Pour la sûreté des réacteurs nucléaires tant électrogènes que dédiés à la propulsion navale ou à la recherche, il est indispensable de démontrer la tenue des barrières de confinement ultimes en réponse à un scénario accidentel d'explosion hydrogène. Après l'accident de Three Mile Island aux Etats-Unis en 1979 qui a mis en évidence ce risque à l'échelle d'un réacteur de puissance, l'accident de Fukushima a rappelé l'importance de ces phénomènes dans le déroulement et la gestion de l'accident.

Une telle situation implique tout d'abord une source d'hydrogène, ensuite la distribution de cet hydrogène à l'intérieur du confinement avec la formation d'un nuage explosif de grande taille, enfin l'explosion de ce nuage et la sollicitation dynamique de l'enceinte de confinement conduisant à son éventuelle rupture. L'analyse requiert donc une bonne compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, leur mesure dans des expériences de qualité, leur modélisation et la mise en place d'outils de simulation pour évaluer les risques à l'échelle des réacteurs et vérifier l'adéquation des moyens de prévention.

Aujourd'hui, le risque hydrogène est pris en compte dès la conception des réacteurs, par la présence de moyens de prévention généralement à base de recombineurs catalytiques attrayants pour leur caractère passif. A cet effet, il est bon de rappeler que les recombineurs catalytiques d'hydrogène, s'ils réduisent bien le risque, ne permettent pas toujours de s'affranchir de la création d'un nuage inflammable et donc de la nécessité d'évaluer les conséquences d'une éventuelle combustion.

Au CEA comme à l'IRSN et à EDF, cette activité de recherche et développement s'est très vite inscrite dans un contexte international tant pour l'aspect expérimental que pour la simulation numérique. Pour le CEA, cette vingtaine d'années de travaux a conduit à développer des compétences spécifiques capitalisées au sein de l'équipe du DM2S. La transmission et la circulation de cette connaissance a toujours été une préoccupation avec des interventions dans les formations, l'accueil de nombreux stagiaires, doctorants et chercheurs étrangers et bien sûr des publications et des participations à des congrès. Ce savoir-faire reconnu se doit d'être pérennisé afin de faire face aux futures questions posées par une exigence de sûreté sans cesse accrue.

2 DEMARCHE SCIENTIFIQUE, QUESTIONS POSEES, OUTILS DEVELOPPES ET REPONSES APORTEES

Historiquement, l'enceinte de confinement était modélisée par un seul volume au sein d'un code système dédié à la chaudière nucléaire afin de fournir la pression en aval de la brèche, pression utilisée pour évaluer les débits massique et enthalpique à la brèche. En parallèle se sont développés des codes dédiés à l'enceinte de confinement dont l'objectif était d'évaluer sa tenue en cas d'accident de dimensionnement comme par exemple le code de calcul JERICHO développé par le CEA. Seuls les bilans de masse et d'énergie étaient utilisés avec donc, une modélisation ponctuelle des enceintes de confinement (code de type LP ou *Lumped Parameter* en anglais) faisant de fait l'hypothèse d'homogénéité de l'atmosphère. Pour la combustion, seul l'état d'équilibre correspondant à la réaction complète, adiabatique et isochore (AICC) était estimé et comparé à la pression de dimensionnement. Sous l'impulsion de nos collègues allemands, à la fin des années 90, une modélisation multi-ponctuelle voire multidimensionnelle (ou CFD, acronyme anglais pour *Computational Fluid Dynamics*) commençait à apparaître. Pour participer à ces travaux et étudier les installations françaises, le CEA a lancé deux ambitieux projets alliant modélisation numérique et expériences de validation : les projets TONUS et MISTRA. L'IRSN, partenaire du CEA dans ces projets, a lancé le programme TOSQAN sur la distribution et en collaboration avec le CNRS et EDF le programme ENACCEF sur la combustion.

2.1 LE CODE TONUS POUR LE CALCUL DE LA DISTRIBUTION

Le transport et le mélange des différents constituants contenus dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement doivent être calculés localement et non plus globalement. L'outil TONUS combine les deux approches précédentes [1].

Dans l'approche point, les grandeurs calculées correspondent aux valeurs moyennes des différents champs dans chaque compartiment. Elles sont issues d'équations de bilan de masse et d'énergie écrites pour chaque compartiment. Des corrélations et des modèles spécifiques construits à l'échelle du compartiment permettent de combler le manque d'informations locales et de fermer le problème. Les jonctions connectant deux compartiments du réseau permettent au fluide de passer d'un compartiment à l'autre. Le débit est calculé non pas par une équation de quantité de mouvement dans toute sa généralité mais par sa version simplifiée soit une équation 1D de type Bernoulli. Les paramètres de cette équation ainsi que la définition du réseau sont du ressort de l'utilisateur si bien qu'un certain savoir-faire est nécessaire pour limiter l'effet utilisateur. A noter également qu'aucun phénomène diffusif n'est pris en compte, les gradients n'ayant que peu ou pas de sens physique à cette échelle.

Le passage d'un à plusieurs volumes a permis dans un premier temps de mieux calculer la pression en évitant que toutes les structures ne participent dès les premiers instants aux transferts thermiques par condensation de la vapeur pénétrant dans l'enceinte. Le faible coût d'un calcul et la relative facilité à modéliser les différents éléments d'un scénario accidentel (phénomène, systèmes, etc.) a également permis à ces méthodes de s'imposer dans les évaluations probabilistes de sûreté où un grand nombre de cas doit être calculé.

L'approche la plus à même de répondre à l'ensemble des attentes de la communauté nucléaire pour traiter du risque hydrogène est l'approche multidimensionnelle (CFD). Les variables d'intérêt étant calculées sur chaque maille élémentaire, la représentation spatiale est plus précise qu'avec quelques dizaines de compartiments. Il est donc possible de calculer des gradients et de prendre en compte

tous les modes de transfert de masse et d'énergie (diffusion, convection, etc.) et donc de mieux évaluer le risque de combustion de l'hydrogène grâce à une représentation plus précise des atmosphères explosives. Son utilisation systématique se heurte encore au coût des calculs compte tenu de la disparité entre les échelles en espace et en temps devant être résolues dans le volume de l'enceinte de confinement et la durée d'un scénario. C'est pourquoi l'approche OD est encore utilisée afin de sélectionner les cas nécessitant une évaluation plus fine en CFD.

2.2 L'INSTALLATION MISTRA POUR LA VALIDATION DE LA DISTRIBUTION DANS TONUS

L'installation MISTRA [2] se compose d'une enceinte en acier de 97.6 m³, isolée thermiquement de 7.38 m de hauteur et 4.25 m de diamètre interne (**Figure 1**). Elle est représentative des enceintes de confinement des REP du parc électronucléaire français avec une réduction linéaire d'échelle d'un facteur 10. A l'intérieur de l'enceinte sont installés 3 condenseurs régulés thermiquement de sorte que la température de paroi est imposée. On s'affranchit ainsi de la nature de la paroi condensante (acier ou béton) et on pourra traiter tout type d'enceinte de confinement. Notons aussi, que MISTRA est actuellement la seule installation permettant d'étudier la distribution spatiale de la condensation.



2002



2015

Figure 1 : MISTRA Simulateur expérimental de l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire pour l'étude de la dispersion de l'hydrogène

Les circuits d'injection de vapeur et de gaz dans l'enceinte permettent d'imposer un débit et une température ; ces injections pouvant se faire en différents endroits.

Côté métrologie, l'enceinte MISTRA est munie d'un maillage fin de thermocouples pour la mesure de la température du mélange gazeux, de celle des parois des condenseurs et des structures en acier. Le mélange gazeux est caractérisé par des prélèvements et des analyses des échantillons par spectrométrie de masse. Enfin, des hublots peuvent être installés pour faire des mesures de vitesse par vélocimétrie laser Doppler (LDV).

Plus de 200 essais ont été réalisés depuis la mise en service de MISTRA en 1999. La démarche expérimentale a été graduelle tant en termes de géométrie (volume libre, encombré), de

positionnement et caractéristiques de l'injection et de régimes d'écoulement (stationnaire, transitoire).

Elle s'est, tout d'abord, appuyée sur des essais correspondant à des régimes permanents à savoir un équilibre entre la vapeur d'eau injectée par un diffuseur et la vapeur d'eau condensée sur un ou plusieurs condenseurs (série M et essai MICOCO). On valide ainsi le modèle de mélange air/vapeur des outils numériques, les corrélations d'échanges en paroi. Ensuite, les expériences ont visé des transitoires entre deux régimes permanents (Phase A et B) comme par exemple les essais pour l'ISP47 [3]. On a pu ainsi valider l'effet d'injection d'hélium représentant l'hydrogène sur la condensation en paroi en transitoire et sur le second régime permanent.

Après ces essais en volume libre, il subsistait la nécessité de prendre en compte le compartimentage d'une enceinte de confinement. Pour MISTRA, il a été choisi de définir un compartimentage à partir d'une forme géométrique simple, un cylindre vertical muni d'une collerette externe, maintenant la symétrie de révolution. La série M a été poursuivie avec toujours les mêmes conditions initiales et aux limites mais une localisation de l'injection dans les différentes zones créées par le compartimentage. Le modèle ne retrouve que partiellement l'effet du compartimentage et les lois de fermeture de la condensation en paroi sont en cours d'amélioration.

Ensuite, le travail s'est focalisé sur le problème important de la stratification gazeuse c'est-à-dire la formation d'une zone riche en hydrogène et stagnante. Le moteur de la dispersion de cette zone ne pourra être que la diffusion. Pour un REP, le temps de diffusion excède une vingtaine de jours ce qui est difficilement acceptable pour la sûreté. Dans MISTRA pour les projets SETH2 et HYMERES, une atmosphère riche en hélium, simulant l'hydrogène, a été créée en partie supérieure de l'enceinte par injection latérale. Nous avons ensuite étudié la dilution par diffusion moléculaire mais aussi la capacité d'un jet à diluer ou éroder cette stratification [4]. Toutes les situations ont été étudiées expérimentalement et ont fait l'objet de calculs.

Parmi les moyens de prévention passifs, le recombineur catalytique est le seul dispositif qui permette une réduction de l'inventaire en hydrogène. En construisant un recombineur thermique (les plaques catalytiques sont remplacées par des plaques électriques), l'effet de ce dispositif sur une stratification d'hélium en partie haute (programme SAMARA-ERCOSAM) ou en partie basse (projet HYMERES) a pu être instruit. Notons aussi que de nombreux essais de caractérisation de ce dispositif ont été réalisés au préalable. Les résultats montrent que la convection naturelle générée par le recombineur thermique n'affecte pas le volume en-dessous de celui-ci d'une part et d'autre part qu'elle peut limiter les échanges en perturbant le brassage généré par la condensation en paroi.

Ces études ont été enrichies récemment par des essais dans le cadre du projet ANR/RSNR MITHYGENE afin de caractériser la mise en place d'une stratification gazeuse en présence de condensation en paroi. En parallèle, l'IRSN a étudié le comportement des recombineurs dans les atmosphères représentatives avec le développement du code SPARK et sa validation sur les essais des projets REKO, OCDE/THAI et THAI2 [5].

L'ensemble de ces travaux a permis à l'IRSN de réaliser des calculs CFD de distribution de l'hydrogène dans l'enceinte d'EPR afin de juger de la suffisance des dispositifs mis en place pour la prévention du risque hydrogène (Figure 2).

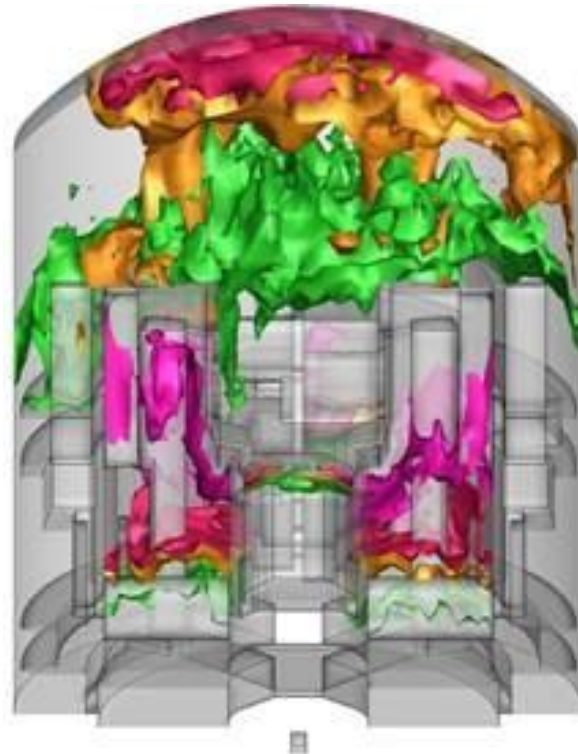


Figure 2 : Calcul TONUS pour EPR : nuages inflammables à 4% d' H_2 (vert – limite d'inflammabilité), 8% (orange – flamme tridimensionnelle), 11% (rouge – limite d'une possible forte accélération) et 18% (violet – limite d'une possible détonation)

Pour conclure sur les travaux réalisés sur la distribution, nous devons mentionner ceux menés pour les démonstrations de sûreté des enceintes de confinement des réacteurs de propulsion navale et d'ITER.

2.3 LE CODE TONUS POUR LA COMBUSTION ET VALIDATION ASSOCIEE

Pour modéliser l'explosion du nuage inflammable [6], la première étape a été le développement dans CAST3M d'un solveur compressible réactif précis et robuste. Ensuite, les travaux de validation se sont, tout d'abord, concentrés sur la propagation d'une détonation du fait de sa relative « simplicité » à l'échelle où nous la modélisons. Ce modèle a été appliqué par exemple, pour évaluer la pression sur les structures de l'enceinte à vide d'ITER suite à une détonation.

Le traitement numérique de la déflagration est beaucoup plus complexe car :

- les écoulements sont à plus basse vitesse ce qui peut représenter une source d'oscillations ;
- la vitesse de propagation n'est plus une valeur constante caractéristique du problème à résoudre ; en effet, la flamme s'accélère de par les couplages forts entre l'écoulement et la zone de réaction chimique.

La contrainte des grandes échelles géométriques rend illusoire de s'intéresser en détail à la zone de réaction chimique dont l'épaisseur n'excède pas quelques millimètres et il n'est pas non plus possible de modéliser finement les phénomènes intervenant dans la propagation d'une déflagration. Il a donc été choisi de négliger les termes visqueux sous un argument de grande taille de maille et d'utiliser des méthodes de propagation d'interface. La dernière en date est une extension aux écoulements réactifs de la méthode des équations discrètes (RDEM). La combustion est donc vue comme deux phases : les gaz frais et les gaz brûlés séparées par la flamme.

Ce modèle a été développé dans CAST3M et ensuite porté dans l'outil EUROPLEXUS, outil de dynamique rapide du CEA, afin de bénéficier, entre autre, d'un couplage avec la dynamique de la structure et du caractère massivement parallèle de cet outil. Un travail conséquent de validation sur plus d'une vingtaine de cas de propagation de déflagration dans des géométries compartimentées à grande échelle a permis de fixer une taille de maille nécessaire (20 cm) afin de capturer correctement les signaux de pression importants pour la dynamique des structures et un paramètre utilisateur conservatif pour les applications de sûreté.

Depuis, un modèle plus mécaniste a permis d'améliorer le caractère prédictif du modèle [7] sans pour autant résoudre toutes les situations. Citons par exemple, l'étouffement de la flamme qui n'a été prédit par aucun modèle de la communauté internationale lors de l'exercice de calcul ISP49.

3 INNOVATIONS ET DEVELOPPEMENTS RECENTS

Les études de sûreté portant sur le risque hydrogène ont été reprises à EDF à partir de 2006, suite à des demandes de l'ASN pour réévaluer ce risque avec les outils numériques et méthodologies d'études à l'état de l'art. L'outil CFD *Code_Saturne* a été utilisé pour la simulation des scénarios de la distribution d'hydrogène [8]. Les résultats de ces calculs servent de conditions initiales pour les simulations de combustion dans le bâtiment réacteur.

Différents calculs de combustion dans des enceintes de confinement du parc ont été réalisés sur des maillages de plusieurs millions d'éléments (Figure 3). Ces simulations ont fourni une charge mécanique sur la paroi et les structures internes de l'enceinte, charge dépendant des phénomènes locaux. Ce travail a permis l'élaboration d'une méthodologie pour l'analyse du risque et démontré la faisabilité de calculs à grande échelle pouvant être intégrés à une démonstration de sûreté.

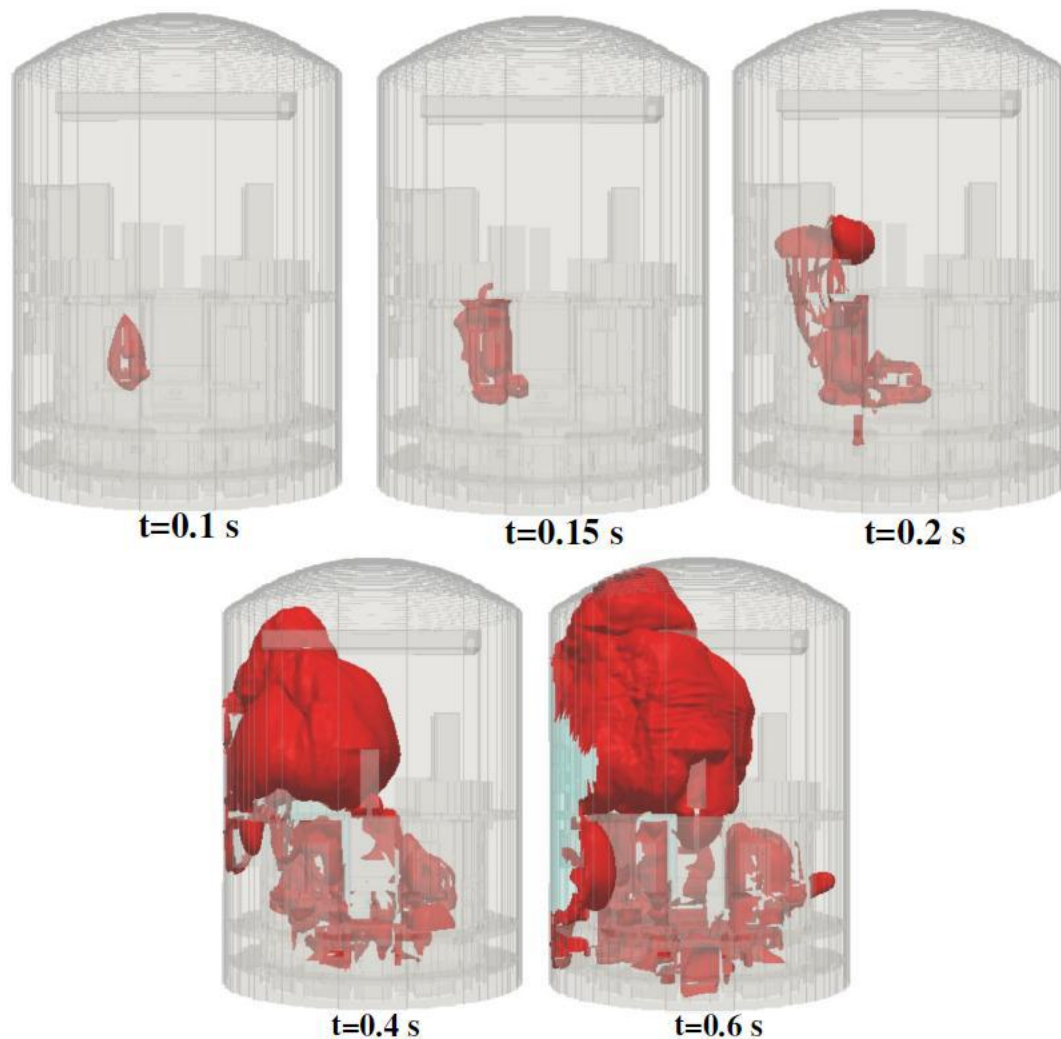


Figure 3 : Forme de la flamme calculée à divers instants pendant la propagation.

Les futurs réacteurs doivent disposer de moyens passifs d'évacuation de la puissance résiduelle. Parmi les systèmes innovants, le CEA s'est intéressé avec EDF aux condenseurs d'enceinte. Pour les faibles concentrations de vapeur à long terme, l'efficacité est insuffisante et le dispositif doit être optimisé. Les modèles ont aussi besoin de données expérimentales quantitatives quant aux performances et à l'interaction avec le risque hydrogène. Des essais MISTRA sont en préparation.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Tous ces travaux ont permis d'obtenir des résultats significatifs pour la compréhension des mécanismes gouvernant la thermohydraulique de l'enceinte de confinement et le risque hydrogène.

Concernant les perspectives, tout d'abord, pour les aspects expérimentaux, le passage à des compartiments plus représentatifs des internes semble incontournable même si la métrologie associée au suivi des ATEX, nécessairement plus complexe, est à développer. Il est aussi vraisemblablement nécessaire de repenser l'instrumentation des expériences en alliant instrumentation fixe et instrumentation mobile ou métrologie intelligente. Des coopérations entre diverses unités du CEA sont à développer en ce domaine. Parmi les thématiques nécessitant une consolidation des connaissances expérimentales, citons par exemple le risque ATEX lors de

l'éventage d'une atmosphère contenant de l'hydrogène tant d'un point de vue interne à l'enceinte qu'au niveau des lignes de dépressurisation et l'efficacité du système d'aspersion. Ces deux points peuvent être couplés à l'utilisation d'internes plus réalistes.

Parmi les questions futures, il est important de mentionner celles relatives aux SMR (*Small Modular Reactor*) car les concepts foisonnent avec beaucoup d'innovation sur les enceintes de confinement.

Tous les travaux précédents ont montré une interaction forte entre expérience et modélisation nécessitant des deux côtés une certaine flexibilité tant pour la gestion des conditions aux limites que pour le découplage des phénomènes ou même l'obtention des variables d'intérêt (flux, surface de flamme, etc.). Durant ces 20 dernières années, nous avons observé, à l'occasion de notre participation à différents benchmarks dédiés à notre thématique, une large utilisation des codes dits commerciaux par rapport aux outils dédiés développés en interne. Dans un code commercial, le noyau dur du code est utilisé en boîte noire. L'utilisateur-développeur implémente si nécessaire quelques termes spécifiques et la vérification et la validation du code, déléguée à la communauté, devient donc de son ressort pour son domaine d'application. Le CEA n'a pas fait ce choix pour maintenir la flexibilité et bénéficier de plateformes de R&D. Dans le fond, la dualité flexibilité/efficacité conduit assez naturellement à envisager deux types d'outils numériques, à savoir : d'un côté, un premier outil, agile en termes d'architecture, avec un langage de commande simple, manipulant peu d'objets et permettant de tester des modèles et d'un autre côté, un outil optimisé dédié au calcul haute performance. Pour l'instant, nous avons pu mener à bien cette stratégie pour la combustion avec TONUS et Europlexus, tous deux développés et maîtrisés par le CEA. Pour la distribution, des résultats probants ont été obtenus tant sur la modélisation que la validation. En revanche, l'optimisation et l'efficacité incluant le calcul haute performance sont un chantier à ouvrir.

Si à grande échelle, les modèles de dispersion semblent prédictifs, il ne faut pas oublier que pour la combustion la précision demandée au mélange est localement inférieure à 1 pour 100 molaire. C'est pourquoi, une voie d'investigation indispensable à ouvrir porte sur le déploiement de méthodes de propagation d'erreur et d'incertitudes, d'autant que les conditions initiales et aux limites des systèmes étudiés sont souvent mal connues.

Avec l'évolution des moyens de calcul, une question ouverte est de savoir si l'utilisation d'une approche CFD avec un maillage du volume constitué d'un nombre réduit d'éléments ne serait pas préférable à un calcul multi-compartiments. En augmentant le nombre de mailles on bénéficierait *a priori* de théorèmes de convergence de la solution numérique vers la solution physique, ce qui n'est pas le cas en augmentant le nombre de compartiments.

Pour les modèles de combustion, la première étape à venir est la consolidation de l'interaction entre les gouttes d'aspersion et la flamme qui se propage en intégrant les résultats obtenus dans les projets MITHYGENE et THAI2. Pour la validation, nous devons aussi exploiter les résultats des projets HYgrade et ENACCEF sur la combustion dans des mélanges hétérogènes en concentration, point de première importance pour les applications. Les résultats des essais SSEXHY fourniront aussi des données importantes. Enfin, numériquement, nous allons étendre le modèle RDEM aux bas nombre de Mach et nous intéresser aux modèles de frontières immergées pour traiter du déplacement des obstacles et des fragments lors des combustions violentes. Les résultats attendus de ces investigations seront mis à profit pour répondre aux questions de sûreté telles que la tenue, aux charges en pression et en température générées par la combustion, des équipements nécessaires à la gestion d'un accident grave.

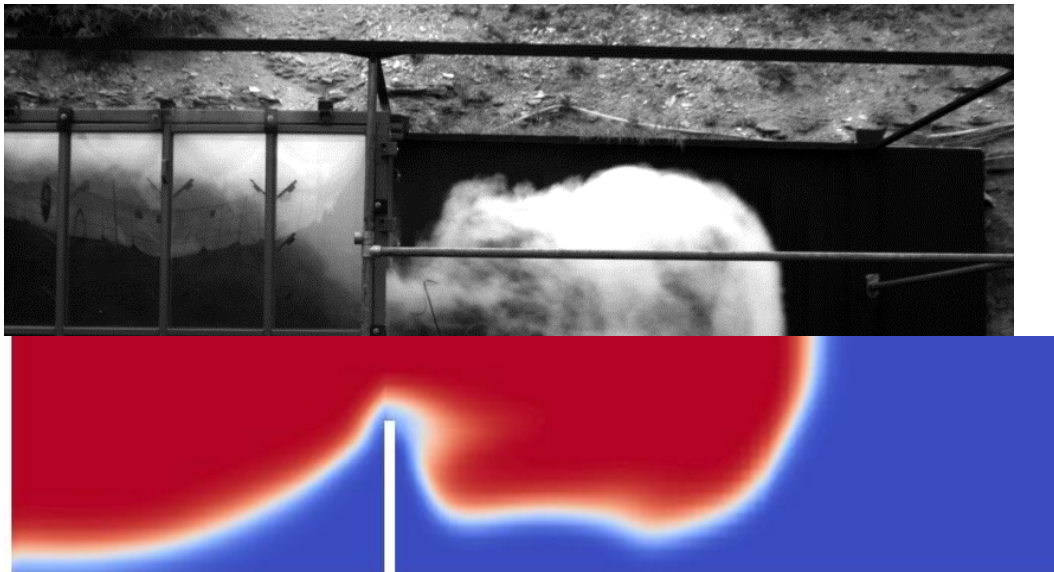


Figure 4 : ANR/DIMITRHY : Comparaison Expérience/Simulation avec EUROPLEXUS pour une explosion hydrogène avec un événement. Valorisation des recherches pour la filière hydrogène-énergie.

Enfin, la valorisation du travail réalisé sous l'impulsion de l'industrie de l'énergie nucléaire a des retombées significatives pour la sûreté des installations industrielles, notamment, pour les producteurs d'hydrogène et les législateurs, quant à l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Le CEA a participé aux projets de l'Agence Nationale de la Recherche DRIVE, DIMITRHY (Figure 4), HYDROMEL, BARPPRO et aux projets européens HYSAFE NATURALHY, HYPER et permis ainsi de s'enrichir des connaissances et des méthodes développées et utilisées dans ces cadres. Le partage d'installations expérimentales et la confrontation de modèles numériques, particulièrement les modèles CFD, constituent des retombées importantes pour les industriels devant faire face à la dispersion et l'explosion de gaz inflammables.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce document souhaitent remercier Henri Paillère, Isabelle Tkatschenko, les développeurs de CAST3M et d'EPX (Europlexus) et, tous les étudiants, doctorants, chercheurs étrangers ainsi que tous nos collègues qui par leurs questions ont entretenu notre motivation.

6 TRAVAUX CITES

- [1] S. Kudriakov, F. Dabbene, E. Studer, A. Beccantini, J.-p. Magnaud, H. Paillère, A. Bentaib, A. Bleyer, J. Malet, E. Procheron et C. Caroli, «The TONUS CFD code for hydrogen risk analysis: physical models, numerical schemes and validation matrix,» *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, pp. 551-565, 2008.
- [2] I. Tkatschenko, E. Studer et H. Paillère, «MISTRA Facility for Containment Lumped Parameter and CFD Codes Validation: Example of the International Standard Problem ISP47,» chez *International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia*, 2005.
- [3] E. Studer, J. Magnaud, F. Dabbene et I. Tkatschenko, «International standard problem on

- containment thermal–hydraulics ISP47: Step 1—Results from the MISTRA exercise,» *Nuclear Engineering and Design*, vol. 237, n° 15, pp. 536-551, 2007.
- [4] E. Studer, J. Brinster, I. Tkatschenko, G. Mignot, D. Paladino et M. Andreani, «Interaction of a light gas stratified layer with an air jet coming from below: large scale experiments and scaling issues,» *Nuclear Engineering and Design*, vol. 253, pp. 406-412, 2012.
- [5] A. Bentaib, N. Meynet et A. Bleyer, «Overview on hydrogen risk research and development activities: Methodology and open issues.,» *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 47, n° 11, pp. 26-32, 2015.
- [6] E. Studer, S. Kudriakov et A. Beccantini, «Combustion et explosion de prémélanges gazeux et sûreté des installations,» *Les Techniques de l'Ingénieur*, vol. AF3682 V1, 2016.
- [7] A. Velikorodny, E. Studer, S. Kudriakov et A. Beccantini, «Combustion modeling in large scale volumes using EUROPLEXUS code,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 35, pp. 104-116, 2015.
- [8] S. Mimouni, W. Benguigui, S. Fleau, A. Foissac, M. Guingo, M. Hassanaly, J. Lavieville, J. Malet, N. Méchitoua, N. Méricoux et S. Vincent, «Dispersed Two-Phase Flow Modeling for Nuclear Safety with NEPTUNE_CFD Code.,» *Hindawi, Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2017, n° 13238545, p. 41, 2017.