

Etude expérimentale et modélisation de la combustion d'hydrogène dans une atmosphère humide

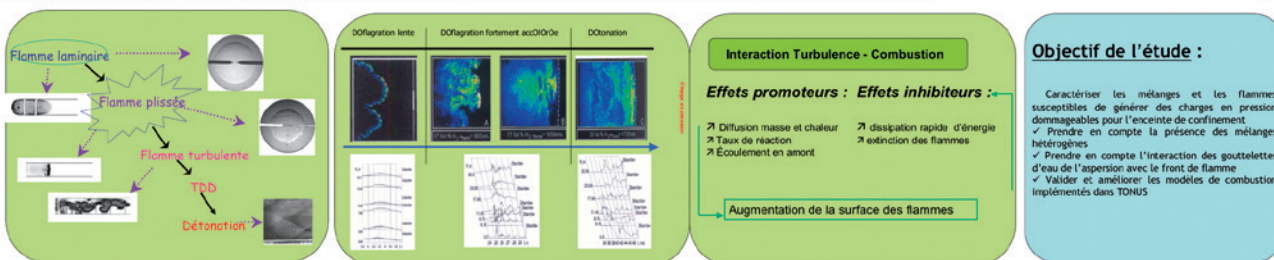
Homan Cheickhravat, Ahmed Bentaib, Alexandre Bleyer, Cataldo Caroli *

Nabiha Chaumeix, Claude Paillard, Mohamed Yahyaoui **

* Direction de la Sécurité des Réacteurs, IRSN, BP17 92262, Fontenay Aux Roses

** Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement, CNRS UPR 3021, ORLÉANS

En cas d'accident de fusion du cœur dans un REP, il existe un risque de perte de l'intégrité du confinement du réacteur à la suite d'une combustion de l'hydrogène. L'hydrogène est produit lors de la dégradation du cœur par l'oxydation des métaux des gaines du combustible et des structures internes du cœur. Il est transféré dans l'enceinte par la brèche primaire initiatrice de l'accident et transporté par les boucles de convection induites par la condensation de la vapeur rejetée dans l'enceinte. Cet hydrogène peut atteindre des concentrations locales importantes qui dépassent le seuil d'inflammabilité du mélange gazeux. Ces concentrations et leur répartition dans l'enceinte de confinement peuvent être modifiées par l'utilisation du système d'aspersion. Les conséquences d'une combustion éventuelle dépendent du régime de combustion. Les régimes des flammes susceptibles de se produire dans une enceinte de confinement sont les flammes laminaires. Sous l'effet des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence ces flammes peuvent s'accélérer et générer des surpressions dommageables pour l'enceinte. Pour pouvoir évaluer le risque d'explosion d'hydrogène dans les enceintes des réacteurs, l'IRSN a initié et poursuit une collaboration avec l'institut ICARE, laboratoire de renommée mondiale, afin de disposer des critères permettant de discriminer les scénarios accidentels dangereux pour la tenue du confinement.

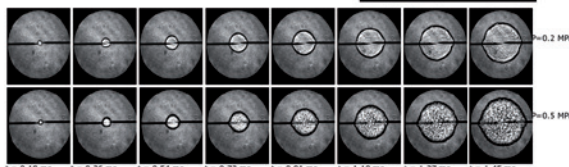


I. Etude des flammes laminaires Données fondamentales (SL, Le, β , σ ,...)

Mesure en bombe sphérique du rayon du front de flamme et qualification des modèles cinétiques pour en déduire :

- la vitesse fondamentale de flamme
- l'énergie d'activation
- les nombres adimensionnels Le, Ma, ...
- le coefficient d'expansion α

Mélange H_2 - Air à température ambiante



II. Caractérisation des Flammes Accélérées



III. Interaction Flamme / Gouttelettes

Dispositifs Expérimentaux

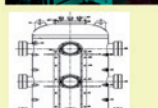
Cas des Flammes Laminaires

- Bombe Sphérique de 350 mm de diamètre
- 440000 en quart de 100mm de passage optique
- Inflammation Centrale
- Pression maximale de service = 30 bars
- Température maximale de service = 250 °C
- Injection d'eau
- Caractérisation du brouillard (diamètre moyen et fraction volumique)
- Enregistrement de la pression en fonction du temps
- Visualisation de la flamme au cours du temps



Cas des flammes turbulentes

- Modification du dôme d'ENACEF
- Installation de nouvelles fenêtres de Visualisation
- Isolation d'un système d'injection
- Détection de la flamme au cours de son trajet
- Mesure de l'évolution de la pression dans l'enceinte



Les systèmes d'aspersion permettent de contrôler le niveau de pression dans l'enceinte en cas d'accident avec rejet dans l'enceinte de l'eau du circuit primaire de refroidissement :

- par refroidissement de l'atmosphère
- et condensation de la vapeur d'eau
- Mais, en présence d'hydrogène on peut induire
- le dessèchement de l'atmosphère de l'enceinte par condensation de la vapeur d'eau
- Risque d'inflammation et d'accélération de la flamme
- Nécessité d'étudier l'interaction Flamme / Gouttelettes
- En fonction du régime de la flamme, laminaire ou turbulent
- En fonction du diamètre moyen et de la fraction volumique en gouttelettes
- Caractérisation de l'augmentation de la turbulence induite
- Expansion de la phase condensée

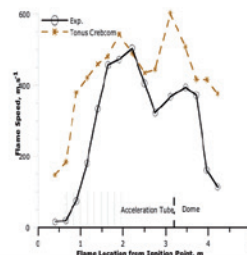


Flamme en phase gazeuse homogène

Flamme en présence de gouttelettes

Conditions nécessaires pour qu'une flamme s'accélère : $\sigma > \sigma^*$
Constitution de bases de données d'essais pour valider les codes de combustion

Simulation Numérique de la propagation de flamme fortement accélérée



IV. Bilan et Perspectives

- Acquisition d'un ensemble de données sur les propriétés explosives de mélanges H_2 - Air - H_2O nécessaires à l'amélioration des modèles de propagation de flammes en milieu encombrés d'obstacles.
- Consolidation des critères de transition de régime des déflagrations lentes vers le régime des déflagrations rapides pour les mélanges homogènes
- Extension des critères de transition pour les mélanges hétérogènes

- Amélioration et validation des codes de calcul de combustion
- Caractérisation des interactions flammes/gouttes d'aspersion
- Développement d'un modèle d'interaction Flammes / Gouttelettes d'eau
- 1/1 Flammes laminaires $\Rightarrow$ Bombe sphérique
- 2/2 Flammes turbulentes $\Rightarrow$ ENACEF

Homan Cheickhravat, Mohamed Yahyaoui, Nabiha Chaumeix, Claude-Etienne Paillard, "Influence of Hydrogen distribution on flame propagation", Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Poitiers, France (2007)

J.H. Lamoureux, F. Hallet, N. Djebelli-Chaumeix, A. Bentaib, A. Bleyer, C.E. Paillard, "3D Gradient Effect on Premixed Flame Propagation in a Vertical Facility: ENACEF", Proceedings of the 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Montreal, Canada (2005)

J.H. Lamoureux, N. Djebelli-Chaumeix, C. Paillard, "Laminar flame velocity determination for H_2 - air - H_2O mixtures using the spherical bomb method", Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 27, pp. 389-393, (2003)

K.H. Djebelli-Chaumeix, N. Lamoureux, C. Chauveau, C.-E. Paillard, "Flame acceleration characterization in a vertical obstructed closed device: ENACEF", Proceedings of the 18th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Hakone Japan (2001)

**Homan Cheickhravat*, Ahmed Bentaib*, Alexandre Bleyer*, Cataldo Caroli*
Nabiha Chaumeix**, Claude Paillard**, Mohamed Yahyaoui****

**Institut de combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement, CNRS UPR 3021, Orléans

Dans le contexte de l'étude des accidents graves de REP, le risque hydrogène est défini comme la possibilité d'une perte de l'intégrité du confinement du réacteur ou de ses systèmes de sûreté à la suite d'une combustion de l'hydrogène. L'hydrogène est issu principalement de l'oxydation du zirconium des gaines et des structures des éléments combustibles lors de la phase de dégradation du cœur et de l'oxydation des métaux présents dans le bain de corium ou dans le radier lors de la phase de l'interaction entre le corium et le béton. L'hydrogène ainsi produit est transféré dans l'enceinte par la brèche primaire initiatrice d'un accident grave puis transporté dans l'enceinte par les boucles de convection induites essentiellement par la condensation de la vapeur émise via la brèche primaire ou lors de l'interaction corium/béton. Suivant le brassage de l'atmosphère de l'enceinte, la répartition d'hydrogène dans l'enceinte de confinement se fait de manière plus ou moins homogène. En cas de forte hétérogénéité, l'hydrogène peut atteindre des concentrations locales importantes qui dépassent le seuil d'inflammabilité du mélange gazeux. La combustion peut être initiée dans un mélange, réputé inflammable, à l'aide d'une source d'énergie de quelques mJ. Aussi en présence de sources électriques et suite à des manœuvres d'actionneurs, de points chauds, il apparaît probable que l'inflammation se produise assez rapidement après l'entrée dans le domaine de combustion. En revanche, il faut une source d'énergie beaucoup plus importante (au moins 100kJ) pour déclencher une détonation stable dans le mélange : ceci explique qu'une détonation directe soit pratiquement exclue dans les enceintes de réacteurs et que le seul mécanisme retenu pour provoquer une détonation soit l'accélération de flamme et la transition déflagration-détonation. Il est donc nécessaire d'étudier les mécanismes régissant l'accélération de flamme de pré mélange ; c'est l'objet de la collaboration entre l'IRSN et le laboratoire ICARE.

La collaboration entre l'IRSN et le laboratoire ICARE porte sur l'étude expérimentale de la propagation de flamme de pré mélange d'hydrogène dans une atmosphère humide représentative des enceintes de confinement en situation d'accidents graves. L'objectif de ces travaux est double et consiste, d'une part à caractériser la transition de régime de flamme lente vers le régime de flamme rapide et, d'autre part, à produire une base de données pour valider les codes de calcul utilisés par l'IRSN dans le cadre de l'évaluation de sûreté. Deux types de campagnes peuvent être distingués :

- les essais analytiques en bombe sphérique, ayant pour vocation de caractériser les flammes laminaires et de bâtir une base de données qui servira pour la caractérisation a priori des régimes de flamme ;

- les essais dédiés à l'étude des flammes turbulentes et réalisés sur l'installation ENACCEF. Les résultats de ces essais sont utilisés à la fois pour déduire des « critères a priori » pour distinguer les régimes de flamme et pour valider les codes de calcul. Le travail réalisé a conduit d'une part à l'amélioration des « critères a priori » existants et qui expriment, pour les mélanges homogènes, les conditions nécessaires à la transition entre les régimes des flammes lentes et des flammes rapides. D'autre part, le travail réalisé dans le cadre de cette collaboration a permis aussi d'étendre ces critères aux mélanges hétérogènes. Par ailleurs, la réalisation des essais ayant conduit à l'établissement de ces critères a permis de constituer une base de données importante pour valider les codes de calcul de combustion.

La collaboration entre IRSN et ICARE se poursuit pour étudier l'impact de la présence de gouttes d'eau suspendues dans l'atmosphère sur la propagation de flammes d'hydrogène. Ce travail permettra, in fine, de généraliser les critères d'accélération de flamme aux situations où l'aspersion est mise en service par exemple.

Nombre des essais déjà réalisés ont servi pour organiser un benchmark dans le cadre du projet européen SARNET et pourront servir de base à l'organisation du prochain ISP (International Standard Problem) combustion sous l'égide de l'OCDE-CSNI. Les résultats obtenus dans le cadre de ce programme ont fait l'objet de publications dans des revues et de présentations dans des conférences spécialisés.



NOTES