

## Explosions accidentelles de gaz dans des mélanges hétérogènes

L'amélioration des moyens de prédictions des conséquences des explosions est une problématique de grande importance. Bien que les moyens de prédictions deviennent de plus en plus performants, ils sont basés sur des hypothèses simplificatrices comme celle d'un nuage combustible homogène. Dans les scénarii réels d'explosion, un nuage gazeux qui explose suite à un rejet accidentel présente des hétérogénéités de concentration se superposant à un écoulement turbulent. L'objet de ce travail est d'évaluer l'influence d'un gradient de réactivité au sein du nuage explosif sur les effets potentiels de l'explosion (déformation de flamme, évolution de la pression, de l'impulsion...).

**Objet.** Cette étude, menée conjointement par l'INERIS et le Laboratoire Énergétique Explosions Structures (LEES), s'inscrit dans un projet plus vaste dont l'objectif est l'amélioration des moyens de prédiction des conséquences des explosions dans l'industrie. L'analyse révèle que des progrès significatifs dans ce domaine ne seront pas possibles tant que les modalités d'interaction d'une flamme de prémélange avec son environnement ne seront pas mieux précisées. Il n'y a pas que la turbulence de l'écoulement qui modifie les propriétés de la flamme et les conséquences d'une explosion mais également la répartition de la réactivité dans le nuage explosif. De ce fait, on suppose généralement, parfois implicitement, que le nuage qui explose est uniforme et homogène. Mais, en pratique, le nuage résulte souvent d'un rejet accidentel d'une substance chimique dans l'air qui conduit à un mélange gazeux non uniforme et donc à des gradients de concentration, ou de pression, ou de température. À ces gradients correspondent des répartitions du degré de réactivité et par suite une aptitude plus ou moins grande à réagir. Ces gradients ont une influence sur les conséquences de l'explosion [1, 2].

On se propose d'étudier les explosions dans des milieux réactifs non-uniformes en situation confinée afin de pouvoir mieux contrôler l'ensemble des paramètres physiques et de comprendre la physique de ces explosions.

Il s'agit de mettre en évidence les spécificités du développement de l'explosion (flamme et pression) lorsque le mélange réactif est rendu progressivement non uniforme et de proposer une représentation physique des phénomènes. Ces travaux font donc appel à la fois à l'expérience et à la théorie sachant que les deux régimes de propagation, déflagration et détonation, peuvent être observés. Il s'agit d'être capable de décrire les relations entre l'évolution de la surface de la flamme, sa vitesse, les effets de pression associés et les régimes de propagation atteints.

**Concept expérimental.** Le montage expérimental testé est un tube vertical fermé de 2 m de long et de diamètre 0,03 m, favorisant l'apparition des instabilités de flamme [3]. Une paroi amovible ("guillotine") sépare le tube en parties égales, la composition des gaz étant différente de part et d'autre. L'ouverture de la guillotine permet le mélange des gaz par diffusion naturelle. Deux versions de tube ont été réalisées.

Le premier tube, en polycarbonate, couplé à une technique de tomographie laser, a permis d'étudier les mécanismes de formation des gradients de concentration ainsi que de mesurer les concentrations par diffusion de traceur.

Le second tube est un tube métallique utilisé pour propager une flamme au travers d'un prémélange gazeux contenant un gradient de concentration contrôlé par diffusion moléculaire. Sur la bride basse est placée la source d'inflammation. Deux essais ont été réalisés contenant chacun la même quantité de  $\text{CH}_4$ , mais l'un avait une répartition homogène de la concentration, l'autre avait une répartition hétérogène (figure 1).

Les profils de pressions (figure 2) montrent que la forme, la durée et la surpression maximale sont totalement différentes. La fin de la combustion correspond au pic de pression maximale précédant la décroissance exponentielle due au refroidissement des gaz brûlés à la paroi.

- Pour le milieu homogène, la durée totale de la combustion est d'environ 0,75 s. La surpression maximale est très différente de la surpression théorique d'une explosion volumique (~ 9 bars). La durée de refroidissement des gaz brûlés à la paroi, d'environ 0,1 s, est beaucoup plus petite que le temps de combustion de sorte qu'il est très probable que le refroidissement concurrence le taux de dégagement de chaleur de la flamme. Les oscillations observées sont en lien direct avec la résonance du tube, elle-même dépendante de la température. En utilisant la loi de Mariotte, on trouve que la surpression finale d'explosion n'excède pas 2 bars, ce qui est en accord avec les expériences.

- Pour le milieu hétérogène, la fin de la combustion indiquée par le maximum de pression atteinte est d'environ 1,5 s. Au-delà, la pression diminue, en raison

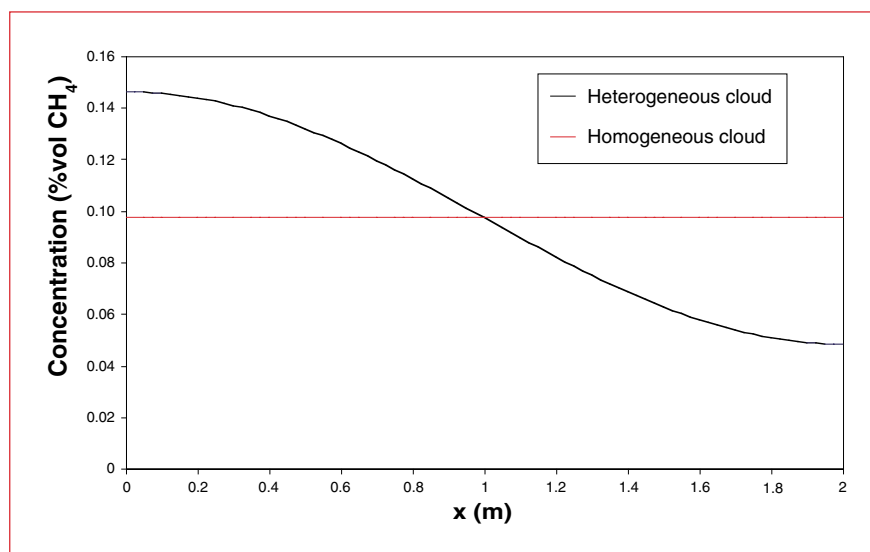


Figure 1. Répartition de  $\text{CH}_4$  le long du tube.

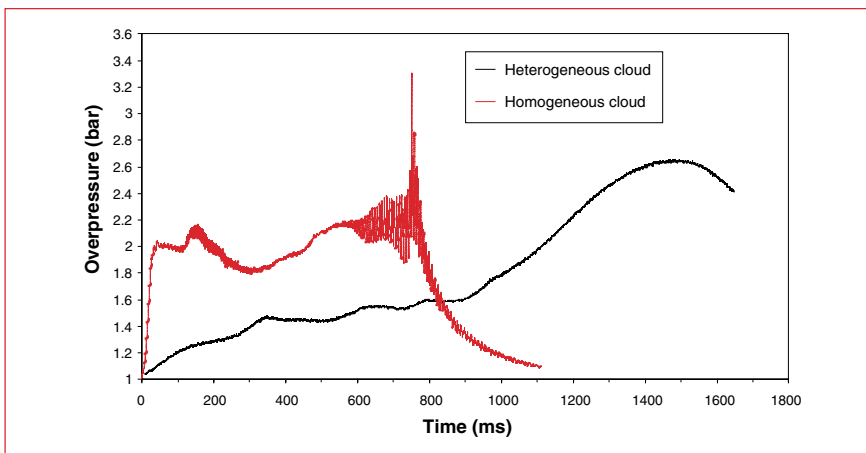


Figure 2. Signaux de pression pour une répartition de concentration homogène et hétérogène.

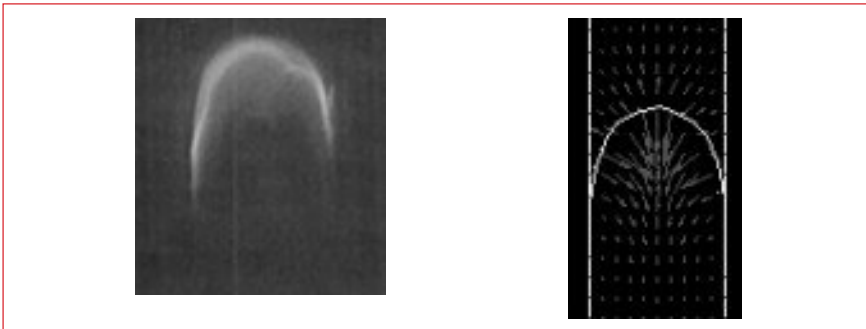


Figure 3. Comparaison entre une flamme de méthane réelle et simulée.

4

du refroidissement mais à une vitesse très lente par rapport à la situation d'un milieu homogène. Si on admet que la combustion est adiabatique jusqu'à 0,9 s, on montre que la flamme a seulement brûlé environ 0,2 m du mélange initial. D'après la figure 1, la position de la flamme correspond à une zone loin des limites d'inflammabilité où la vitesse d'expansion augmente. Cette variation du régime de combustion résulte du gradient de réactivité conduisant à une surpression finale plus importante que dans le cas d'une situation homogène.

**Modélisation.** Pour aider la compréhension du comportement de la flamme, un modèle numérique a été développé. Celui-ci se base sur la constatation que la flamme peut être considérée comme une interface virtuellement sans masse et sans épaisseur transformant les gaz frais (300 K) en gaz brûlés (2 000 K).

Il s'agit d'une adaptation de la méthode "Front Tracking" [4] consistant à représenter un mouvement d'interface dans un écoulement incompressible. L'interface est représentée par un réseau de points interconnectés se propageant à travers un maillage structuré. La vitesse des points de l'interface est interpolée par des points de maille avoisinants, utilisant une fonction barycentrique. Mais l'inter-

face n'est pas inerte, elle possède sa dynamique propre :

- i) la flamme se propage localement à la vitesse fondamentale de combustion ( $S_u$ ) relativement aux gaz frais ;
- ii) à chaque point de l'interface, la composante normale de la vitesse est dilatée en raison de l'expansion thermique et la composante tangentielle est conservée.

L'expansion de la composante normale pendant  $\Delta t$  est en partie transmise aux gaz brûlés, le reste est utilisé pour pousser les gaz frais [5]. La simulation (figure 3) de la propagation d'une flamme de méthane (6,3 % vol.  $CH_4$ ) dans une tube de section carrée de 10 cm de côté et d'1,5 m de long, ouvert du côté de l'inflammation, donne des résultats très satisfaisants.

**Conclusion.** Un modèle relativement simple a pu mettre en avant l'effet non négligeable du couplage entre un gradient de concentration et l'instabilité hydrodynamique. Un nouveau concept expérimental a été élaboré et testé pour étudier ces phénomènes. Les essais préliminaires d'explosion réalisés avec du  $CH_4$  ont montré que les effets de pression étaient plus importants pour un mélange hétérogène. Mais il est apparu que le phénomène observé était pollué par les pertes de chaleur aux parois. C'est la raison pour laquelle nous nous orientons vers des mélanges beaucoup plus réactifs ( $H_2-O_2-N_2$ ).

Même avec une instrumentation sophistiquée, l'interprétation du comportement de la flamme n'est pas aisée en raison de l'interaction complexe entre la flamme et l'écoulement. C'est la raison pour laquelle une nouvelle approche a été développée dans laquelle la flamme est considérée comme une interface ayant sa propre dynamique.

Isabelle Sochet, Jérôme Daubech,  
Laboratoire Énergétique Explosions  
Structures, Bourges

Christophe Proust,  
INERIS, Verneuil-en-Halatte

Ce programme « études des scénarii accidentels du risque explosion de mélanges gazeux non uniformes », dont la coordination est assurée par le CNRI, met en œuvre les moyens du LEES, de l'ENSI de Bourges et de l'INERIS. Il est financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, le Ministère de la Défense, l'Europe, le Conseil Régional Centre, le Conseil Général du Cher et l'INERIS. Il s'inscrit dans le cadre plus général des prédictions des explosions et de leurs conséquences sur leur environnement.

#### Bibliographie

- [1] SOCHET I. *et al.* Experimental investigation on the detonability of non-uniform gaseous mixtures, *Shock Waves*, 10, 363-76, 2000.
- [2] SOCHET I. *et al.* Effect of the concentration distribution on the gaseous deflagration propagation in the case of hydrogen/oxygen mixture, *J. of Loss Prevention in the Proc. Ind.*, 19, 250-62, 2002.
- [3] PROUST Ch. Formation, inflammation, combustion des atmosphères explosives (ATEX) et effets associés, *Mémoire d'HdR Institut National Polytechnique de Lorraine*, 2004.
- [4] UNVERDII S.O. *et al.* A front tracking method for viscous incompressible flows, *J. of Computational Physics*, 100, 25-37, 2004.
- [5] CHU B.T. On the generation of pressure waves at plane flame front, 4th Symp. Int. on Comb., *The Comb. Inst.*, 603-12, 1952.