

# Propagation d'une onde de choc dans une mousse aqueuse

E. DEL PRETE / DGA Techniques terrestres, Bourges

J.-F. HAAS - D. COUNILH - N. RAMBERT - F. BALLANGER / CEA – DAM Île-de-France

L. HOUAS - G. JOURDAN - C. MARIANI / Institut universitaire des systèmes thermiques industriels (IUSTI),  
Unité mixte de recherche 7343 CNRS – Aix-Marseille université

A. CHINNAYYA / Institut Pprime, Unité propre de recherche 3346 CNRS – École nationale supérieure  
de mécanique et d'aérotechnique (ENSMA) – Université de Poitiers

A. HADJADJ / Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (CORIA), Unité mixte  
de recherche 6614 CNRS – Institut national des sciences appliquées (INSA) de Rouen – Université de Rouen

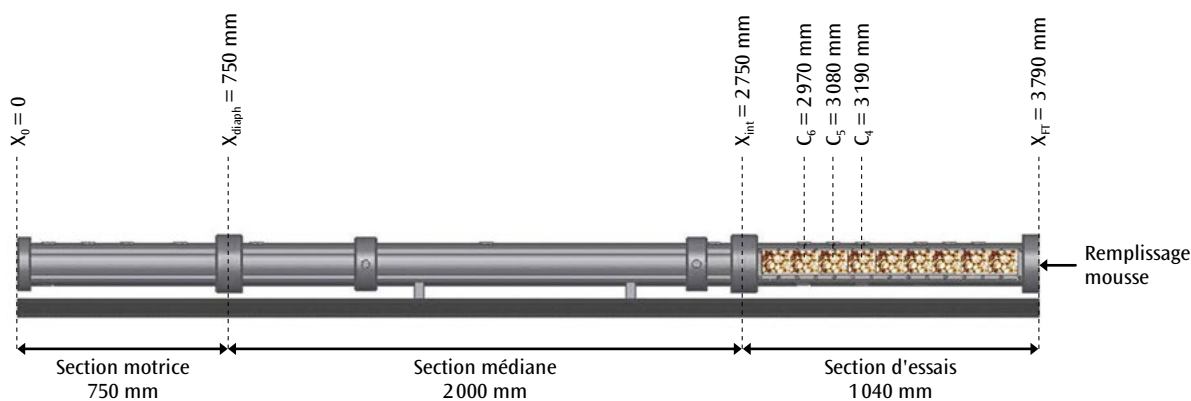
S. FAURE / CEA – Marcoule

Depuis plusieurs années, le CEA s'intéresse à la capacité des mousses aqueuses d'atténuer les ondes de souffle créées par une explosion. Des expériences en tube à choc, menées dans ce cadre, ont été mises à profit pour valider un code multiphasique. Elles ont permis de mettre en évidence les phénomènes prépondérants régissant le comportement des mousses sous choc, en l'occurrence la fragmentation de la mousse en gouttelettes et les transferts de quantité de mouvement entre les phases liquide et gazeuse. Des expériences de détonique générant une onde de souffle confortent ces analyses et montrent le rôle d'atténuation des mousses aqueuses.

Les mousses aqueuses sont utilisées pour atténuer les ondes de souffle créées par une explosion et capturer les particules fines dispersées. La modélisation de ces phénomènes avec le code multiphasique M<sup>3</sup>OUSSACCA [1] nécessite de comparer les calculs aux mesures de pression effectuées dans des expériences simplifiées mettant en jeu des ondes de choc et de détente. Les expériences en tube à choc [2] (TAC) permettent de mesurer l'évolution de la pression avec des capteurs, lors de la propagation d'une onde de choc dans la mousse ou un brouillard d'eau. Les mesures sont alors comparées avec les pressions calculées [3]. Il s'agit ensuite d'ajuster la modélisation des termes d'échange entre les phases liquide et gazeuse.

Ces expériences ont été conduites à l'IUSTI [2]. La section motrice à haute pression du tube à choc

(figure 1) peut être remplie d'air, de SF<sub>6</sub> ou d'hélium pour retarder ou accélérer les ondes de détente qui suivent le choc. La section médiane contient de l'air à pression atmosphérique. La section d'essai contient soit de l'air pour les mesures de référence, soit un brouillard de gouttelettes d'eau, soit une mousse aqueuse. Les sections motrice et médiane sont initialement séparées par une membrane qui se rompt sous l'effet de la différence de pression, ce qui crée une onde de choc à droite et un faisceau de détentes à gauche de la membrane. Choc et détentes se réfléchissent ensuite aux deux extrémités du tube. Le TAC est équipé de plusieurs capteurs de pression dont trois, indiqués sur la figure 1, dans la section d'essai qui mesurent la pression dans le milieu testé. Les essais ont été conduits pour des nombres de Mach de 1,08, 1,3, 1,5 et 1,8.



**Figure 1.** Schéma du tube à choc avec les trois chambres et la position de trois capteurs de pression ( $C_4$ ,  $C_5$  et  $C_6$ ). C'est la rupture d'un diaphragme entre chambres haute et basse pression qui permet la formation d'ondes de choc à droite et du faisceau de détentes à gauche du diaphragme.

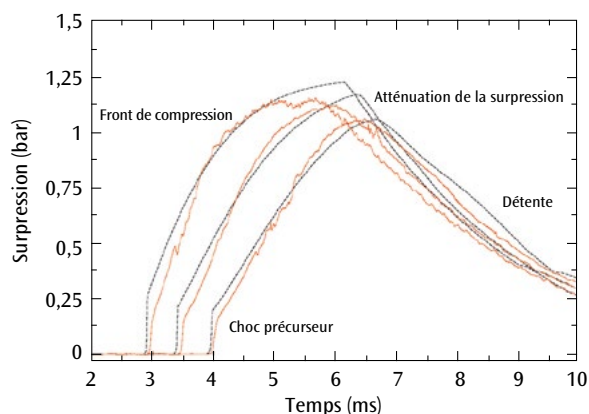
La fraction liquide de la mousse est essentiellement constituée d'eau avec 6 % d'émulseur. La mousse est constituée de bulles d'air de taille submillimétrique, sphériques ou polyédriques, séparées par des films de liquide. Deux types de mousse, produits par un générateur mis au point au CEA – Marcoule, ont été testés: une mousse lourde de fraction volumique de liquide  $\epsilon = 0,0333$  et une mousse légère avec  $\epsilon = 0,0125$ . L'effet de la mousse sur une onde de choc est comparé à celui produit par un brouillard constitué de gouttes d'eau de 0,5 mm de diamètre, avec  $\epsilon = 0,01$ . La visualisation de l'interaction d'une onde de choc faible avec une mousse à bulles millimétriques a permis de discerner plusieurs phases: rupture des films liquides séparant les bulles d'air, puis destruction des filaments (initialement à la jonction de trois films) en gouttes et enfin fragmentation de celles-ci. Dans le cas du nuage de gouttes, il y a rupture en fines gouttelettes.

La **figure 2** est une juxtaposition de quatre profils de pression enregistrés par le capteur  $C_4$  pour un choc de Mach 1,5 dans l'air, le brouillard d'eau, les mousses légère et lourde. Le temps d'arrivée des ondes de choc transmises est d'autant plus long que la fraction volumique du liquide est élevée. La décroissance de la pression dans le brouillard après le choc initial à 2,8 ms est attribuée à la rupture des gouttes. Le très faible choc initial (0,2 bar à 3,6 et 4,4 ms) dans les mousses correspond au seuil de fragmentation des bulles. Globalement, la présence du milieu diphasique permet de diminuer l'intensité de l'onde de choc transmise et de ralentir les ondes.

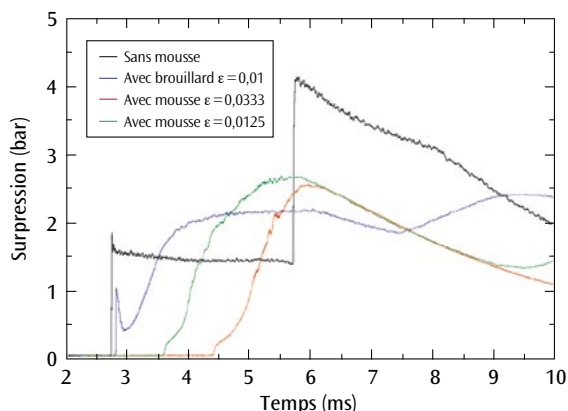
Ces résultats font l'objet de simulations avec le code M<sup>3</sup>OUSSACA [1,3]. Les signaux de pression expérimentaux et numériques pour les capteurs  $C_6$ ,  $C_5$  et  $C_4$  dans le cas d'un choc de Mach 1,3 pénétrant dans une mousse lourde sont donnés sur la **figure 3**. Le faible choc initial est visible, ainsi que les ondes de

compression (étalement du front de choc) et les ondes de détente. Le niveau de surpression diminue au fur et à mesure que l'onde parcourt la mousse. La restitution de l'essai par le calcul est entre autres pilotée par la modélisation de la fragmentation de la mousse et du coefficient de traînée entre les phases liquide et gaz. En dessous du seuil de fragmentation, le coefficient est infini. Pendant la phase de compression, il suit une loi de Stokes modifiée et, pendant la phase de détente finale, le coefficient vaut 1.

En faisant varier la vitesse de l'onde de choc et la fraction volumique du liquide, les expériences en TAC ont permis de valider les termes d'échanges mécaniques du code. Plus largement, l'atténuation de l'onde de choc par la mousse aqueuse a été confortée par des expériences de détonique, réalisées avec quelques grammes à plusieurs kilogrammes d'explosif. Elles montrent qu'à une distance donnée, la surpression dans une mousse aqueuse est divisée par 10 par rapport à la surpression dans l'air.



**Figure 3.** Pressions mesurées (rouge) par les capteurs 6, 5 et 4 dans la mousse lourde et calculées (noir) pour un choc de Mach 1,3. Un bon accord a été obtenu en ajustant le coefficient de traînée selon les phases suivantes: choc initial, onde de compression, onde de détente.



**Figure 2.** Signaux de pression du capteur  $C_4$  lors de la propagation d'un choc de Mach 1,5 dans l'air avec les chocs incident et réfléchi visibles à 2,7 et 5,8 ms (noir), dans le brouillard (bleu), dans la mousse légère (vert) et la mousse lourde (rouge) avec les faibles chocs initiaux suivis de compressions étalées. Le choc est peu visible dans le brouillard et les mousses.

## Références

- [1] E. DEL PRETE *et al.*, "Blast wave mitigation by dry aqueous foams", *Shock Waves*, **23**, p. 39-53 (2013). Voir aussi E. DEL PRETE, thèse de doctorat de l'université de Rouen, soutenue le 31 octobre 2012.
- [2] G. JOURDAN *et al.*, "Experimental investigation of the propagation of a planar shock wave through an aqueous foam", *Physics of Fluids*, **27** 056101 (2015).
- [3] D. COUNILH *et al.*, "Numerical modelling of shock-wave propagation in a shock tube filled with aqueous foam", *Proc. of the 29th International symposium on shock waves (ISSW29)*, Madison, États-Unis, 14-19 juillet 2013, R. Bonazza and D. Ranjan (Eds.), Springer, p. 1511-1516 (2015).