

# Capture de particules par mousses aqueuses

**M. Mikart<sup>a,b</sup>, D. Counilh<sup>a</sup>, F. Ballanger<sup>a</sup>, J-F. Haas<sup>a</sup>, A. Chinnayya<sup>b</sup>,  
F. Gensdarmes<sup>c</sup>**

a.CEA, DAM, Ile-de-France, Arpajon, 91297, France

b. Institut PPrime, UPR CNRS 3346, ENSMA, BP 40109, Futuroscope-Chasseneuil Cedex, 86962,  
France

c. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire IRSN, PSN-RES, SCA, LPMA, B.P 68, 91192  
Gif-sur-Yvette Cedex, France

## Résumé :

*Dans un contexte de protection des biens et des personnes, le CEA DAM s'intéresse aux mousses aqueuses pour leur capacité à confiner une détonation. L'objectif est, d'une part, d'atténuer les effets thermodynamiques liés à la détonation d'un engin explosif et, d'autre part, de capturer les particules solides micrométriques potentiellement nocives pouvant être émises. On s'intéresse particulièrement, ici, à la deuxième problématique.*

*Les mousses aqueuses sont des milieux diphasiques, assemblages de bulles de gaz, encapsulées dans une matrice de films liquides. Pour nos applications, nous utilisons des mousses dites sèches, c'est-à-dire ayant une fraction volumique de la phase liquide inférieure à 5%.*

*Une campagne expérimentale a été menée en 2016, avec pour but la quantification de la dispersion par explosif dans l'air, de particules micrométriques, après traversée ou non d'un confinement par mousse aqueuse. 200 g de particules de tungstène, de diamètre médian  $3,7\mu\text{m}$ , ont ainsi été dispersées dans l'air à l'aide d'une charge explosive de masse 44 g. Plusieurs tailles de confinement ont été testées au-dessus des particules, afin de quantifier la capacité de la mousse à les capturer. Après la détonation de la charge, les particules mises en suspension dans l'air ont été prélevées et les résultats découlant des différentes configurations expérimentales mises en œuvre ont été comparés. Ces résultats permettent de caractériser le taux de capture de particules en fonction des différentes tailles de confinement utilisé.*

**Mots clefs : Particules – Mousse aqueuse – Confinement – Détonation – Capture**

## 1 Introduction

Le confinement de l'explosion d'une charge ou d'un engin explosif est l'un des enjeux des différents acteurs de la Défense. Dans ce cadre, le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives étudie le confinement par mousse aqueuse. Son but est d'atténuer les effets de souffle créés par l'explosion de la charge et de capturer les particules fines et potentiellement nocives pouvant être émises et transportées dans l'air. Des études récentes effectuées au CEA [1], [2] ont montré le rôle important des mousses aqueuses quant à l'atténuation de l'onde de souffle. L'étude menée ici s'intéresse plus précisément à la deuxième problématique et a pour objectif la quantification de la capture de particules micrométriques par une mousse aqueuse sèche.

## 2 La mousse aqueuse sèche

Dans cette partie, nous décrirons la composition, les caractéristiques et les différents types de mousses aqueuses. Nous nous intéresserons ensuite au mode de génération utilisé lors de la campagne expérimentale.

### 2.1 Définition

Une mousse aqueuse est formée d'un assemblage de cellules séparées par des films, des canaux et des nœuds. Sa structure géométrique a été étudiée pour la première fois par Plateau [3]. Les films se rejoignent pour former un Bord de Plateau et les Bords de Plateau se rejoignent pour former un nœud. Une mousse aqueuse est principalement caractérisée par la nature du gaz et du liquide qui la composent, par sa structure géométrique et par son foisonnement. Celui-ci est défini par le rapport entre le volume de mousse produit et le volume de liquide utilisé :

$$F = \frac{V_{mousse}}{V_{liquide}} = \frac{1}{\alpha_{liquide}}$$

Le gaz utilisé dans notre étude est de l'air, et le liquide est une solution moussante constituée de produits chimiques, parmi lesquels, un tensio-actif et des agents stabilisants. Le foisonnement permet de classer les mousses en deux familles distinctes. Les mousses dites humides, pour lesquelles  $3 < F < 20$  et les mousses dites sèches pour lesquelles  $F > 20$ . Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement à des mousses aqueuses sèches, qui ont un foisonnement de 60 ou de 120.

### 2.2 Génération de la mousse aqueuse

Le générateur utilisé pour fabriquer la mousse a été conçu par la société ERPI, dirigée par André Zimmermann et est particulièrement adapté aux expériences pyrotechniques. Il permet de produire plusieurs centaines de litres de mousse par minute avec une bonne reproductibilité et stabilité. Il est composé de deux sous-ensembles : le réservoir de pré-mélange et la lance (cf. schéma en figure 1).

Le réservoir permet de mélanger et de stocker jusqu'à 150 litres de pré-mélange, soit par exemple, de produire  $9 \text{ m}^3$  de mousse pour un foisonnement de 60. Le pré-mélange est formé en mélangeant, dans le réservoir, l'eau et le produit moussant, qui sont ensuite dirigés, grâce à une pompe à débit variable, vers un mélangeur statique. On obtient en sortie un liquide moussant homogène qui est conduit, en temps voulu, vers la lance en actionnant une vanne. La création de la mousse se fait en sortie de la lance, grâce à une série de tamis située derrière la buse de la lance et sur lesquels est aussi appliqué un flux d'air.

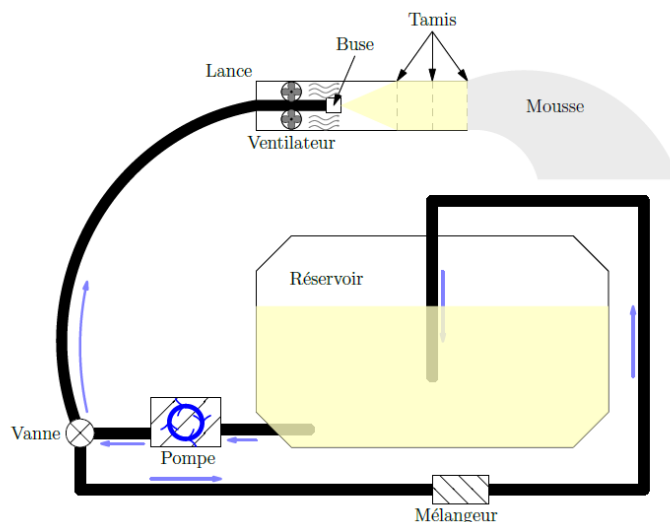


Figure 1. Générateur de mousse

Cette méthode de génération de la mousse permet de souffler des milliers de microbulles simultanément et l'on peut ainsi obtenir une mousse avec une gamme de foisonnement allant de 40 à 140 et un diamètre moyen des bulles de l'ordre de quelques centaines de micromètres. Différentes lances et tamis peuvent être utilisés selon le foisonnement et le débit de mousse désirés.

### 3 Atténuation de la dispersion des aérosols

Le but de la campagne expérimentale ici présentée est de quantifier la dispersion aérienne de particules micrométriques après traversée, ou non, d'un confinement par mousse aqueuse. On disperse dans l'air, à l'aide d'une charge explosive, des poudres de tungstène ; l'aérosol formé est collecté après la détonation à l'aide de préleveurs atmosphériques. En effectuant des essais avec ou sans confinement, on peut ainsi déduire les taux de particules capturées par le confinement aqueux.

#### 3.1 Dispositif expérimental

La campagne, dont le dispositif expérimental est schématisé en figure 2, a été conduite dans une casemate semi-fermée. Une bâche de vinyle fixée sur la partie ouverte a permis de créer une enceinte close. Le montage est constitué d'une table métallique carrée, de 2 mètres de côté, sur laquelle est posée une charge explosive cylindrique de 44g. Elle est située au centre de la casemate et entourée de préleveurs d'aérosols de deux types : des appareils Tish TE5170® et des appareils Algade EAS30K®. Leur rôle est d'aspirer l'air chargé en particules et de récolter celles-ci sur un filtre à très haute efficacité. Les préleveurs Tish ont un débit de prélèvement maximal de 130 m<sup>3</sup>/h et utilisent des filtres rectangulaires de 10 pouces de diagonales. Les préleveurs Algade, ont un débit de prélèvement de 2 m<sup>3</sup>/h et des filtres circulaires de 130 mm de diamètre. La charge explosive est recouverte de 200 g de particules de tungstène, de diamètre médian 3,7 µm. Le dimensionnement de l'expérimentation a été réalisé selon les méthodes développées par Gensdarmes [4].

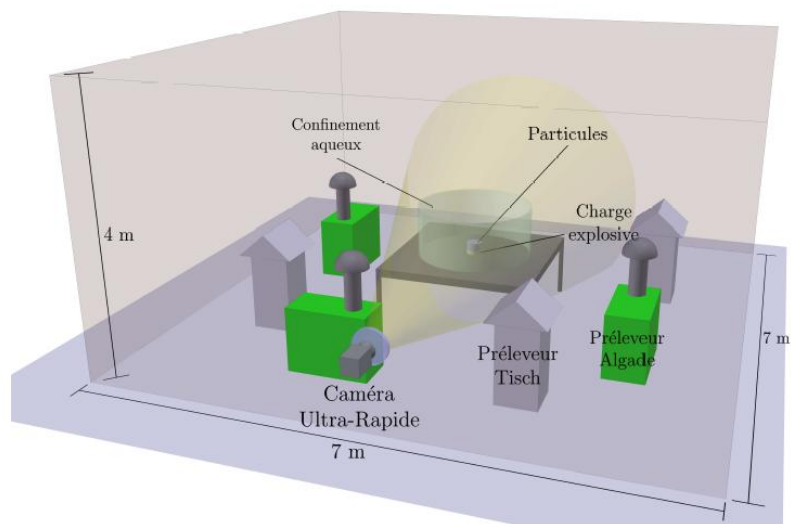


Figure 2. Schéma du montage

Pour les essais réalisés avec mousse aqueuse, trois tailles de confinement ont été testées en conservant un rayon égal à la hauteur : 0,25 m (petit confinement), 0,50 m (confinement moyen) et 1 m (grand confinement). Un grillage en plastique avec un pas de 5 mm permet de contenir la mousse. Pour chaque taille de confinement, deux foisonnements ont été testés : 60 et 120. La mousse a été générée à l'aide du générateur de mousse présenté précédemment.

Une caméra numérique ultra-rapide (Photron® SA-5) a été utilisée afin de visualiser les fronts de détonation et la dynamique des particules.

Les filtres collectés après chaque essai ont été pesés, afin de déterminer la quantité de matière prélevée. Les essais effectués avec et sans confinement ont été comparés dans le but de connaître le taux de capture des particules par la mousse aqueuse.

### 3.2 Résultats expérimentaux

Les images issues de la caméra ultra-rapide seront dans un premier temps analysées, puis, des résultats découlant des filtres récoltés seront présentés.

Sur les images de l'essai non confiné, en figure 3, on observe une projection des particules vers le haut. Elles sont propulsées et dispersées par la charge explosive ainsi que par les produits de détonation. La forte luminescence du nuage de particules rend compte d'une combustion de celles-ci. La dispersion du nuage de particules dans la direction verticale semble être privilégiée (peu d'expansion latérale).

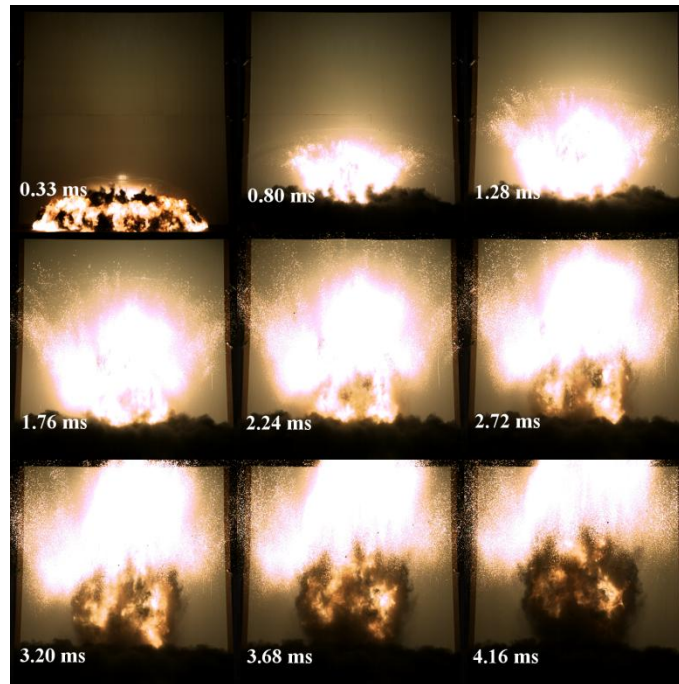


Figure 3. Images d'un essai non confiné

Afin d'observer le comportement des particules confinées par la mousse aqueuse, le champ de la caméra a ensuite été conséquemment élargi. Cela nous a permis d'observer le comportement du confinement, des particules et des produits de détonation jusqu'à 2 mètres au-dessus de la table. La figure 4 nous montre les 16 premières millisecondes d'un essai effectué avec un petit confinement. Sur la première image, on peut voir le confinement intègre, posé sur la table. Après détonation, une grande partie des particules traverse celui-ci, qui est complètement détruit. Le nuage de particules est, là aussi, incandescent. Cela suppose qu'il y a eu combustion et que les particules de tungstène ensuite prélevées pourraient être sous une forme oxydée ( $WO_2$  et  $WO_3$ ). Il est aussi possible que les particules ayant été très proches de la charge se soient agglomérées pour former des particules plus grosses. Dans ce cas, elles retomberaient rapidement au sol et ne seraient pas collectées par les préleveurs.



Figure 4. Images d'un essai avec un petit confinement et un foisonnement de 60

Sur la figure 5 sont présentées différentes images d'un essai effectué avec un grand confinement de foisonnement 60. La première remarque que l'on peut faire est que la mousse ralentit considérablement les particules et en capture la plus grande partie. En effet, à 4 ms, les particules sortent à peine du confinement et en petite quantité. La luminescence de celles-ci est bien moins prononcée que sur la figure 4, ce qui voudrait dire que la mousse inhibe la combustion du tungstène, en absorbant une partie de la chaleur transmise par la détonation. On remarquera aussi que la majeure partie de la mousse reste intègre.

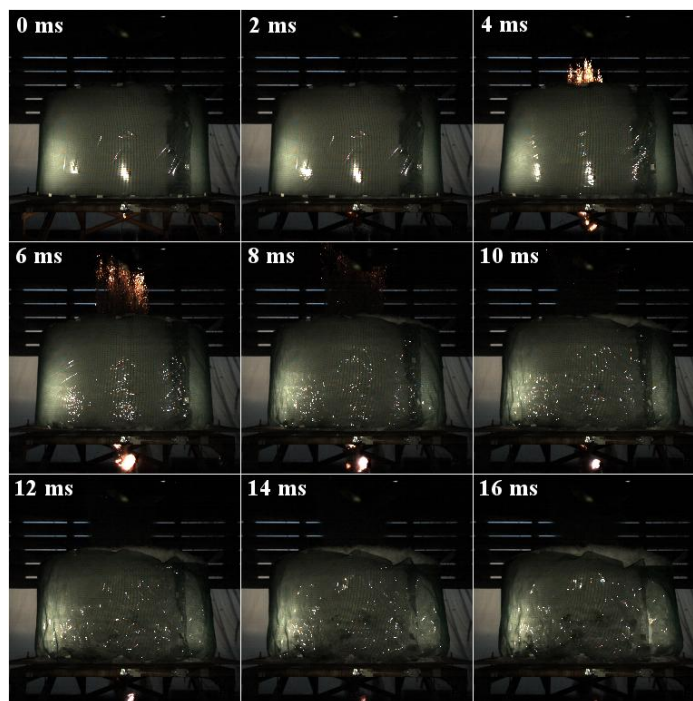


Figure 5. Images d'un essai avec un grand confinement et un foisonnement de 60

Comme mentionné précédemment, des prélèvements ont été effectués après chaque essai, grâce à des préleveurs, sur des filtres en fibre de verre. Une analyse de ces filtres a permis d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur leur contenu. Premièrement, des analyses chimiques ont été effectuées dans le but d'identifier les différentes espèces chimiques présentes sur le filtre. Cela est essentiel pour la caractérisation de l'efficacité du confinement utilisé. La méthode mise en œuvre est la spectroscopie de photoélectrons par rayons X – *X-ray photoelectronspectroscopy* en anglais (XPS) – qui consiste à analyser en énergie les électrons émis par une substance irradiée par un rayonnement X. Cette méthode permet d'accéder directement à l'énergie de liaison des niveaux électroniques de cœur et de valence. L'énergie de liaison au niveau de cœur est spécifique de l'atome et renseigne sur l'état chimique des composés. La distribution en énergie des électrons de valence est caractéristique des liaisons chimiques et de la structure électronique du système. C'est une méthode non-destructive qui analyse la surface de l'échantillon sur une profondeur de 10 nm. Dans un premier temps, on bombarde l'échantillon par des rayons X en balayant une bande spectrale assez large. Cette phase amont n'est pas très précise mais permet d'identifier clairement les différents pics d'énergie qui apparaissent et les orbitales des éléments auxquels ils correspondent. Dans un second temps, on se concentre sur un élément en particulier, en réduisant la bande spectrale à la gamme qui nous intéresse. La figure 6 nous présente le spectre obtenu lors de la première phase, c'est-à-dire sur toute la gamme d'énergie, pour un essai réalisé avec un petit confinement et un foisonnement de 60. Chaque pic correspond à l'orbitale d'un élément. On note plusieurs pics de tungstène, élément initialement dispersé. Ces pics correspondent aux orbitales 4s, 4p, 4d et 4f. D'autres pics révèlent la présence d'oxygène et de carbone qui pourraient provenir respectivement de l'oxydation des particules de tungstène et des produits de détonation.

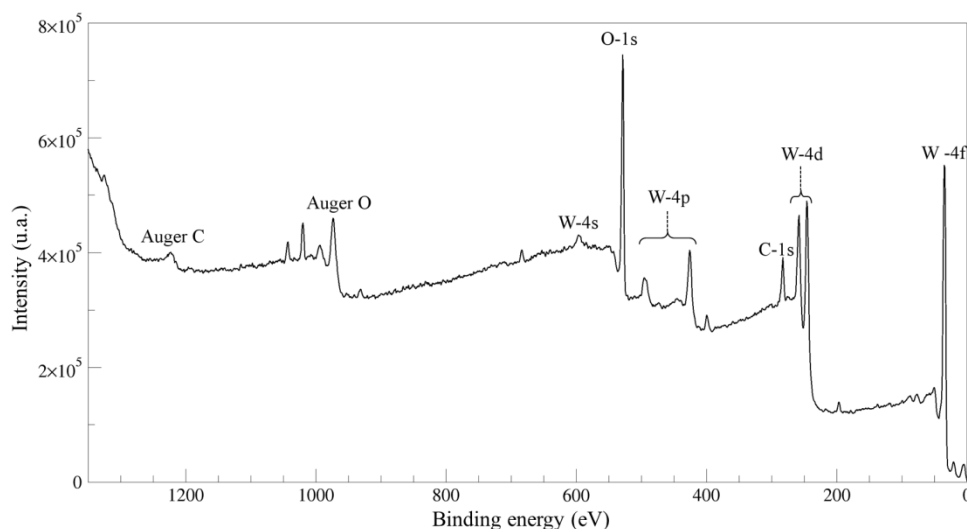


Figure 6. Spectre de photoélectrons, sur l'ensemble de la gamme d'énergie, obtenu sur l'échantillon de l'essai réalisé avec un petit confinement de foisonnement 60

Le pic de tungstène choisi pour la deuxième étape est celui correspondant à l'orbitale 4f, couche la plus éloignée du noyau. Les résultats de cette seconde analyse conduite avec une gamme d'énergie de 30-50 électronvolts sont présentés en figure 7. Grâce à la connaissance exacte des valeurs des énergies de liaisons moyennes ( $E_b$ ) et des largeurs de pics à mi-hauteur (FWHM), on peut déterminer la forme moléculaire sous laquelle se trouve l'élément. Dans notre cas, cette analyse nous montre que le tungstène a été oxydé en  $WO_3$ , forme du tungstène correspondant aux trois pics obtenus. Cependant, la technique XPS ne peut analyser que la surface des particules (10 nm). On ne peut donc conclure sur la nature moléculaire de celles-ci que partiellement, le cœur pouvant être oxydé sous une autre forme ou pouvant ne pas être oxydé.

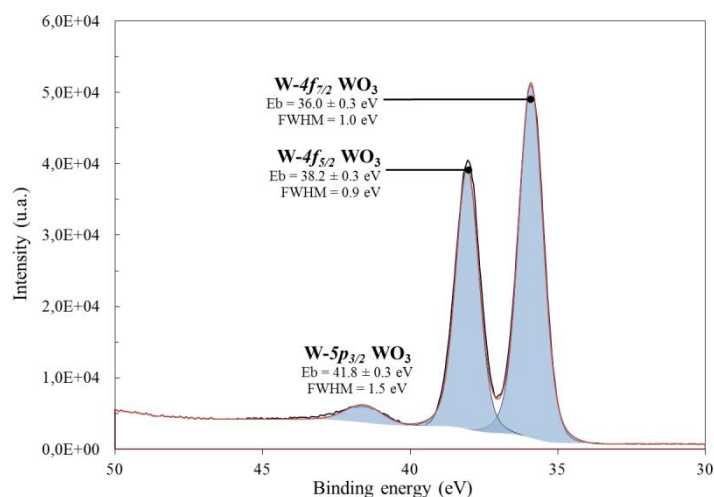


Figure 7. Spectre de niveaux du W-4f

Afin de mieux statuer sur l'état chimique du cœur des particules, une visualisation au microscope électronique à balayage MEB a été effectuée. En effet, en comparant les particules prélevées aux particules de tungstène non oxydées, on pourrait statuer sur un changement d'état de surface ou une diminution de la granulométrie, dans le cas de combustion violente. La figure 8 présente à gauche, une visualisation par MEB de particules de tungstène pur et, à droite, une visualisation des particules prélevées sur un substrat. On remarque que par rapport aux molécules de tungstène pur qui ont une forme relativement sphérique et une surface lisse, le dépôt de particules collectées a un aspect floconneux, laissant penser à un agglomérat de particules bien plus fines que le tungstène initial. Il est donc très probable qu'après détonation, le tungstène se retrouve sous une forme oxydée avec une granulométrie bien plus fine que les 3,7  $\mu\text{m}$  initiaux.

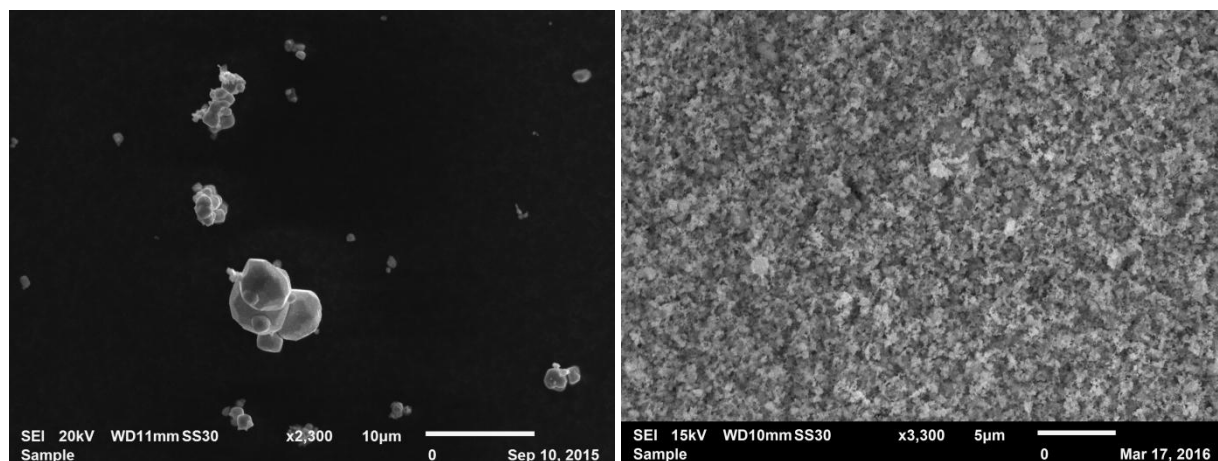


Figure 8. Images de prélèvement obtenues au MEB: particules de tungstène pur (à gauche), dépôt de particules sur un substrat après essai (à droite)

Afin de quantifier le nombre de particules de tungstène prélevées et remonter ainsi au taux de capture de particules par la mousse, une pesée des filtres a systématiquement été effectuée avant et après essai. Les résultats issus des essais réalisés avec particules sont présentés sur la figure 9. De prime abord, on remarque la grande capacité de confinement qu'a la mousse. En effet, entre les deux essais non confinés et les autres essais, on observe un écart en masse minimum de 71%. Il est aussi important de noter qu'entre les deux essais non confinés, on a un écart de 9,2 % alors qu'ils ont été réalisés dans les mêmes conditions. Cet écart peut être dû à l'incertitude de pesée des filtres que l'on estime de l'ordre de 10%.

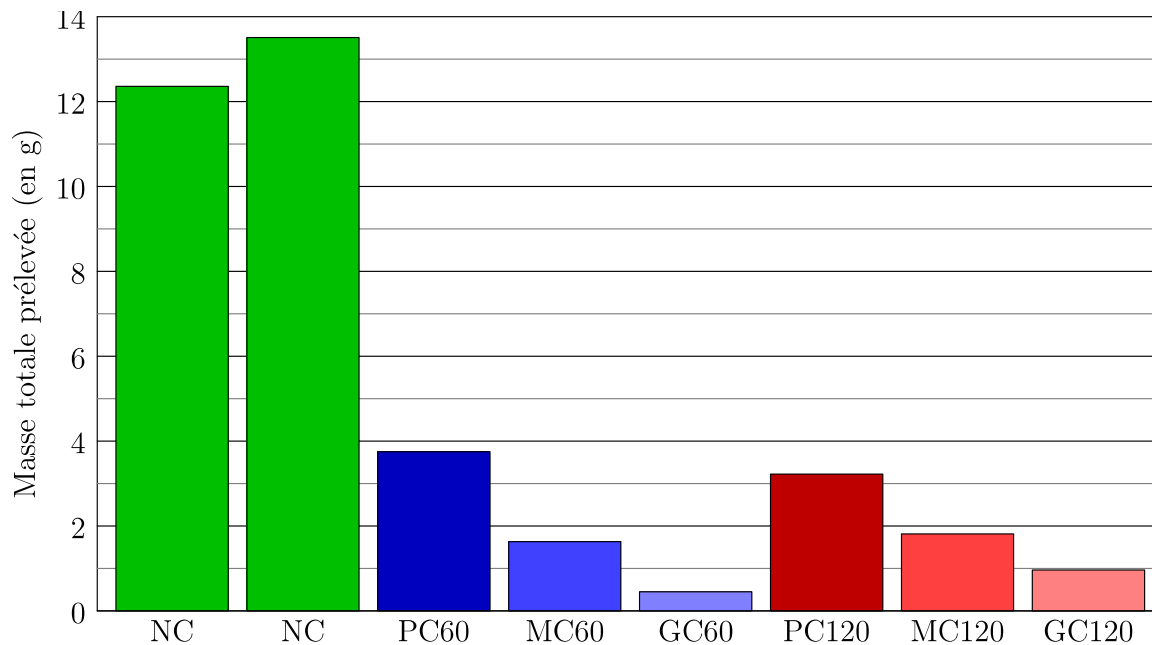


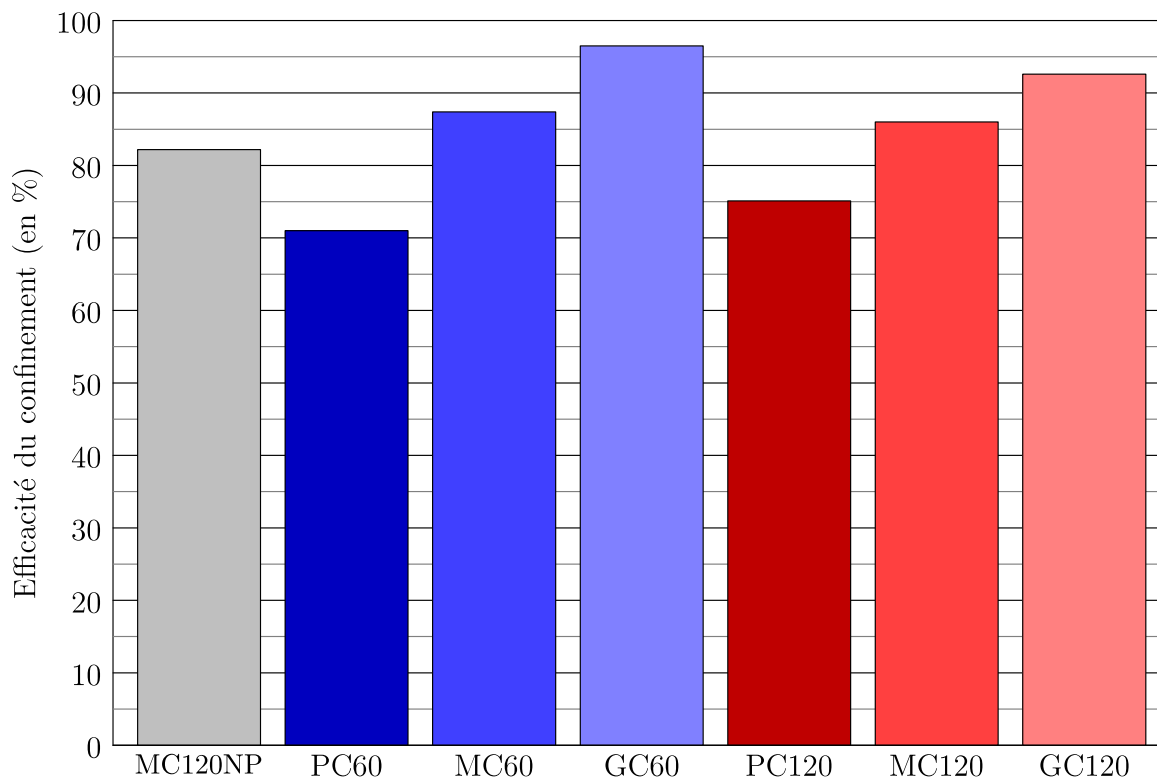
Figure 9. Histogramme présentant la masse totale de particules prélevée sur l'ensemble des filtres pour chacun des essais réalisés avec des particules (NC : non confiné, PC : petit confinement, MC : confinement moyen, LC : grand confinement, 60/120 : foisonnement)



La figure 10 présente l'efficacité  $x_m$  du confinement aqueux dans la capture de particules pour les différents foisonnements utilisés lors des expériences et pour les différents confinements. Cette efficacité est définie comme le taux de capture de particules obtenu selon les confinements utilisés en prenant les essais réalisés sans confinement comme référence.

$$x_m = 1 - \frac{m_c}{m_{nc}}$$

avec  $m_c$  et  $m_{nc}$  les masses de tungstène collectées respectivement sur l'essai considéré et sur les deux essais non confinés pris en moyenne.



**Figure 10. Histogramme présentant l'efficacité du confinement aqueux dans la capture des particules (PC : petit confinement, MC : confinement moyen, LC : grand confinement, 60/120 : foisonnement, NP : sans particules) ; en gris efficacité du confinement dans la capture des produits de détonation seuls**

La première colonne de cette figure (en gris) représente l'efficacité du confinement dans la capture des produits de détonation seuls (essai sans particules). On remarque donc que la mousse est aussi efficace dans la capture des particules issues des produits de détonation que dans la capture des particules de tungstène pour un même confinement donné (cf. MC120NP et MC120). On note aussi que même pour un confinement de petite taille, le taux de capture de particules par la mousse est conséquent. En effet, on capture plus de 70 % des particules avec un petit confinement, 86% avec un confinement moyen et 92% avec un grand confinement. Par contre, en comparant à taille de confinement donné, les résultats pour un foisonnement 60 et un foisonnement 120, on constate que celui-ci n'a que très peu d'influence sur le taux de capture de particules (écart maximal de 4%). Cet écart étant en-dessous des erreurs d'incertitude liées à cette campagne, on ne peut pas conclure sur l'influence du foisonnement sur le taux de capture.

## 4 Conclusion

Cette campagne expérimentale a permis de confirmer le fait que la mousse, même en faible proportion, constituait un moyen efficace pour capturer des particules micrométriques. En effet, avec un petit confinement on capture plus de 50% des particules et on atteint un taux de 92% avec un grand confinement. Elle nous a aussi permis de mettre en exergue le fait que l'influence du foisonnement est mineure sur le taux de capture. Cela sous-entend donc que la géométrie de la mousse joue un rôle prépondérant dans la capture des particules par rapport à la quantité d'eau qu'elle peut contenir. Néanmoins, cette campagne étant la première de ce type effectuée par nos laboratoires, une étude plus approfondie reste à mener afin de confirmer et d'enrichir les différentes conclusions faites ici.

## Références

- [1] E. Delprete, Choc et onde de souffle dans les mousses aqueuses. Etude expérimentale et modélisation numérique, Thèse, Université de Rouen, 2012.
- [2] F. Ballanger, Confinement de la détonation d'un engin explosif par mousse aqueuse sèche : étude expérimentale et numérique, Thèse, ENSMA, 2016.
- [3] J.A.F Plateau, Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires, Editions Gauthier-Villars, 1873.
- [4] F. Gensdarmes, Effet de la sédimentation sur l'épuration d'un aérosolpoly dispersé dans une enceinte, application à l'étude de la mise en suspension par chute de poudre, Rapport technique DPEA/SERAC/LPMAC/03-14, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, CEA/Saclay, France, avril 2003.