

ETUDE EXPERIMENTALE DES AEROSOLS GENERES PAR EXPLOSIFS

Nicolas Lecysyn^{*1}, Pascal Lemaître², Cécile Bodiot²

¹CEA, DAM, Gramat, F-46500 Gramat, France

²Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 91192 Gif-sur-Yvette, France

* nicolas.lecysyn@cea.fr

TITLE

Aerosols explosively generated – experimental study

RESUME

La détonation d'une charge au contact d'un liquide produit des instabilités et de la cavitation, ce qui conduit à la formation d'un nuage de gouttelettes et d'aérosols. La mesure granulométrique au sein de ce nuage n'est pas triviale compte tenu du caractère fortement instationnaire et dynamique de son expansion. Il n'existe d'ailleurs pas de solution de mesure existante à cette fin. Au CEA GRAMAT, une expérience visant à tester une technique de mesure a été menée en collaboration avec l'IRSN. De la fluorescéine sodée a été utilisée comme traceur, un impacteur Andersen a été mis en œuvre. Cette expérience a permis de mettre en lumière l'efficacité et la robustesse de cette technique.

ABSTRACT

The detonation of a high explosive in contact with a liquid produces instabilities and cavitation, which leads to the formation of a cloud of droplets and aerosols. The measurement of particle size within this cloud is not trivial given the highly unsteady and dynamic nature of its expansion. There is no off-the-shelf solution for this. At CEA GRAMAT, an experiment to test a measurement technique was carried out in collaboration with IRSN. Sodium fluorescein was used as a tracer, an Andersen impactor was used. This experiment has highlighted the effectiveness and robustness of this technique.

MOTS-CLES : Détonation, aérosols, granulométrie / **KEYWORDS**: Detonation, aerosol, particle size measurement

1. INTRODUCTION

La dispersion de liquide par explosif est un sujet d'intérêt dans le domaine de la défense, en particulier pour les charges fuel-air (Gardner, 1990), (Singh, 2001) mais également pour des applications civiles comme la lutte contre les feux de forêt (Stefanski, 2009). Il n'existe que très peu de travaux dans la littérature ouverte portant sur la mesure des tailles de particules générées par la détonation, à noter l'approche numérique proposée par (Milne et al., 2010) et (Lei Li et al., 2021) ainsi que le modèle analytique de (Zabelka, 1974) mentionnant des tailles de particules de l'ordre du micron voire en dessous.

Dans cet article, nous étudions expérimentalement la dispersion de liquides au moyen d'explosifs. L'objectif est de déterminer la granulométrie du liquide dispersé dans les conditions dynamiques de la détonation. S'il existe des instruments métrologiques pour les écoulement stationnaires (sprays, injecteurs de carburants-quasi stationnaire), cela devient plus complexe pour les phénomènes instationnaires comme les détonations.

2. PHÉNOMÉNOLOGIE

Une image tirée d'une séquence vidéo rapide illustre le phénomène en figure 1. Il est possible de distinguer une couronne blanche constituée de structures ressemblant à des épines d'oursin.

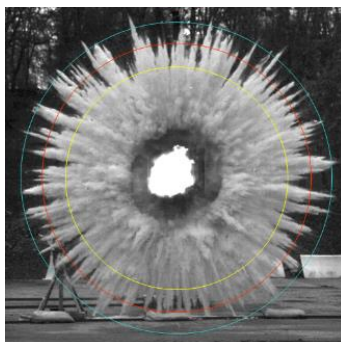


Figure 1. Nuage obtenu en faisant détoner une charge au contact d'eau

L'explosif est au contact de l'eau, juste après la détonation, les produits de la réaction ont une interface instable avec l'eau dont une partie a cavité sous l'effet du choc. Pendant que les instabilités de Rayleigh Taylor à l'interface s'accroissent, la mousse périphérique générée par la cavitation se rompt bulle par bulle en jets

unitaires. Chacun de ces jets s'érodent dans l'air environnant sous l'effet de l'instabilité de Kelvin Helmholtz, ce qui donne naissance à des gouttelettes ($> 10 \mu\text{m}$) ou des aérosols ($< 10 \mu\text{m}$) en fonction de la taille de bulle mère. Ces aérosols sont plus ou moins hydratés suivant l'humidité relative dans la casemate.

3. CONFIGURATION EXPERIMENTALE

3.1. Dispositif expérimental

Le tir a été effectué dans une casemate blindée semi-ouverte, la charge était suspendue à 2 m du sol comme le montre la figure 3. Le ratio de chargement massique liquide / explosif était inférieur à 1 pour les besoins spécifiques à cette étude. L'intérêt de cette configuration est de pouvoir confiner suffisamment longtemps les aérosols produits après la détonation sans qu'il n'y ait trop de réflexions d'ondes de souffle.

Un impacteur Andersen a été implémenté pour caractériser les aérosols produits par l'explosion, ce dernier était protégé dans une casemate blindée mobile (figure 3), connecté à une électrovanne afin de le protéger au moment de la détonation. Cet impacteur va permettre de caractériser à la fois les produits de détonation, mais aussi les gouttelettes émises par la fragmentation du liquide. Pour permettre de différencier ces deux populations d'aérosols un traceur fluorescent (de la fluorescéine sodée) a été dissoute dans le liquide à 50% massiques.

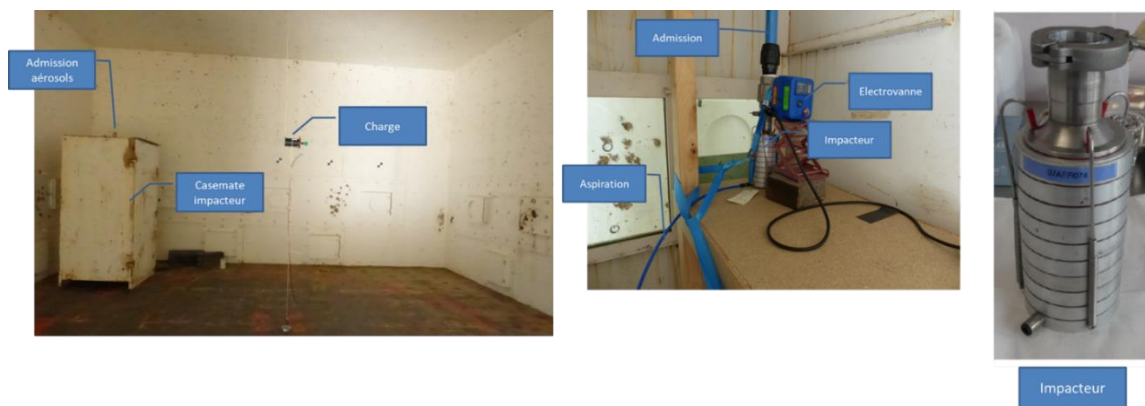


Figure 3. Implantation de l'impacteur Andersen

4. RESULTATS DE MESURES

4.1. Observations

Comme le montre la figure 4, l'expansion du nuage est très limitée et assez clairsemée, ce qui peut laisser penser à une présence majoritaire d'aérosols et de gouttelettes de petite taille.

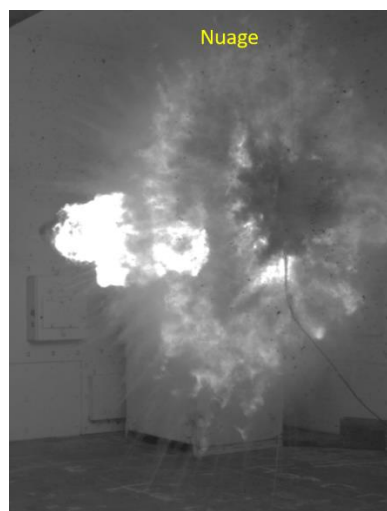


Figure 4. Image prise à $t = 1$ milliseconde

4.2. Détermination de la masse collectée

A l'aide des masses de fluorescéine sodée mesurées sur chaque étage de l'impacteur Andersen, il est possible de déterminer la distribution granulométrique des aérosols liquides produits par la fragmentation du liquide enveloppant l'explosif.

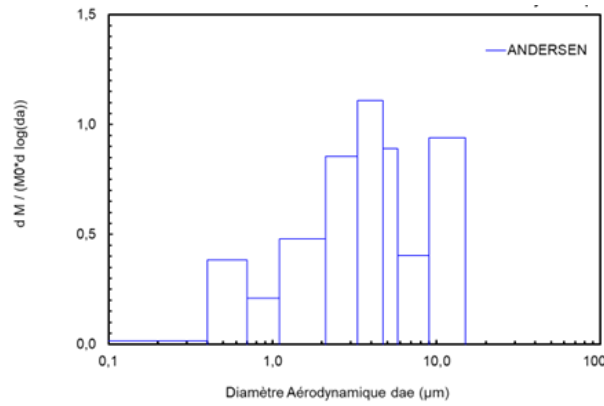


Figure 4. Distribution granulométrique des aérosols liquides mesurés par l'impacteur Andersen consécutivement à une explosion

L'impacteur Andersen classe les aérosols suivant leur diamètre aérodynamique, il est donc nécessaire dans un premier temps de convertir ce diamètre aérodynamique (d_{aero}) en diamètre de Stokes (d_{ap}).

$$d_{ap} = d_{aero} \sqrt{\frac{C_{c,d_{aero}} \left(\frac{\rho_0}{\rho_p} \right)}{C_{c,d_{ap}}}} \quad \text{Équation 1}$$

Dans cette équation le terme C_c est le coefficient de correction de Cunningham, ρ_{ap} est la masse volumique de la particule et ρ_0 la masse volumique de l'eau dans les conditions normales de températures et de pressions. Pour convertir le diamètre aérodynamique en diamètre de Stokes, il est donc nécessaire de connaître la masse volumique de l'aérosol (ρ_p). Les aérosols étant à l'équilibre thermodynamique avec leur environnement, connaissant l'humidité relative dans la casemate ($HR = 35\%$ pour le tir considéré) et l'influence de la fluorescéine sodée sur l'activité de l'eau (a_w , Figure 5), il est possible de déterminer la fraction massique de fluorescéine sodée dans les aérosols ($Y_{Fluo} = 0,925$, pour le tir considéré), car les gouttelettes s'évaporent jusqu'à ce que l'activité de l'eau, soit égale à l'humidité relative ambiante.

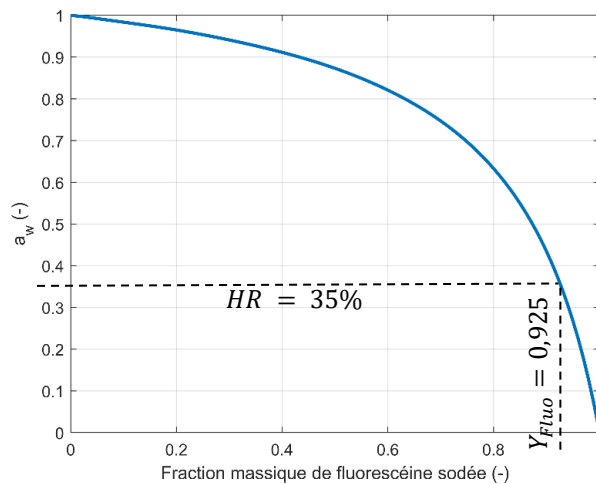


Figure 5. Activité de l'eau en fonction de la concentration en fluorescéine sodée dissoute (Hardy, 2023)

Dans un second temps connaissant la fraction massique de fluorescéine sodée, il est simple de déterminer la masse volumique de la particule ($\rho_p = 1457 \text{ kg.m}^{-3}$).

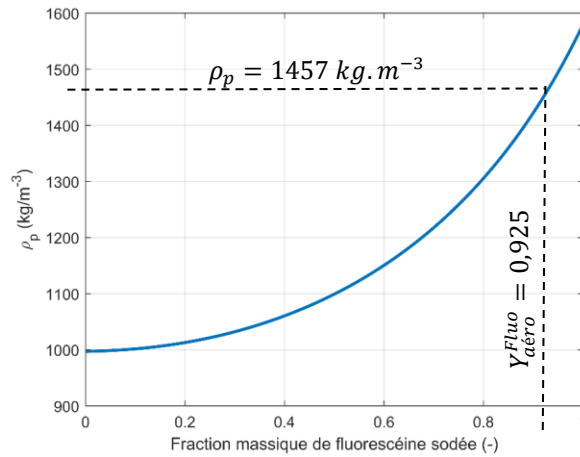


Figure 6. Masse volumique des aérosols en fonction de la fraction massique de fluorescéine sodée

Connaissant la fraction massique de fluorescéine initialement dissoute dans la solution enveloppant l'explosif (Y_S^{Fluo}), il est possible à partir du diamètre de Stokes des aérosols en suspension de déterminer la distribution des tailles de gouttelettes issues de la fragmentation initiale.

$$D_{goutte} = d_{ap} \times \sqrt[3]{\frac{(1-Y_S^{Fluo})(Y_{aéro}^{Fluo})}{(1-Y_{aéro}^{Fluo})(Y_S^{Fluo})}} \quad \text{Équation 2}$$

Et enfin, connaissant la masse volumique des aérosols il est possible de convertir ces distributions en masses en distributions en nombres. Nous observons sur la figure 7 que les gouttelettes présentent deux modes un premier aux alentours de 30 µm et un second proche de 10 µm formé de gouttelettes satellites.

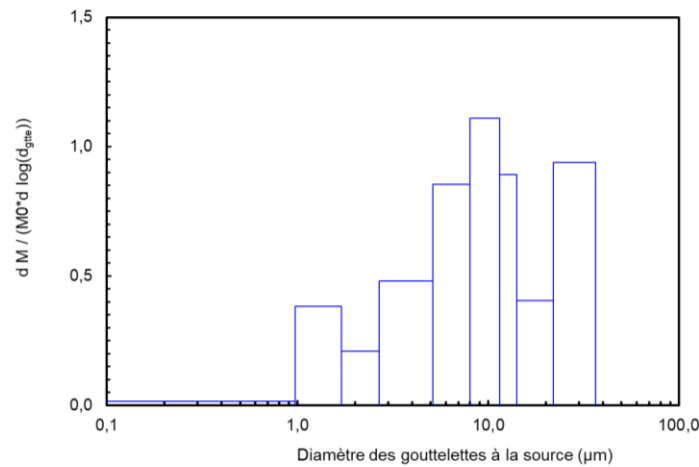


Figure 7. Distribution des tailles de gouttelettes issues de la fragmentation du liquide enveloppant l'explosif

5. CONCLUSION

La mise en œuvre d'un impacteur Andersen dans un nuage de particules générées par une détonation a permis de montrer qu'il est possible de mesurer une distribution granulométrique malgré les conditions extrêmement instationnaires de l'écoulement : un verrou technologique a ainsi été levé.

6. RÉFÉRENCES

- D. R. Gardner, «Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air explosives,» Sandia National Laboratory, Sandia, (1990).
- S. Singh et V. Singh, «Extended Near-Field Modelling and Droplet Size Distribution for Fuel-Air Explosive Warhead,» Defence Science Journal, vol. 51, n°13, pp. 303-314, (2001).
- K. Stefanskil, «Explosive Formation and Spreading of Water-Spray Cloud – Experimental Development and Model Analyses,» Central European Journal of Energetic Materials, vol. 6, n°13-4, pp. 291-302, (2009).

- A.M.Milne, C.Parrish, I.Worland, « Dynamic fragmentation of blast mitigants » Shock Waves, vol 51, pp20-41. (2010)
- Lei Li, Xiao-xia Lu, Xiao-bin Ren, Ye-jun Ren, hou-tian Zhao, Xiao-fang Yan, « The mechanism of liquid dispersing from a cylinder driven by central dynamic shock loading », Defence Technology, vol 17, pp. 1313-1325. (2021)
- R.J. Zabelka, L.H.Smith, « Explosively dispersed liquids », Technical report AD863268. Naval Weapons Center. (1974)
- Hardy, D. A.. Studies of Particle Formation via Aerosol Microdroplet Drying. (2022)