



**HAL**  
open science

## Endommagement sous impacts liquides de céramiques transparentes

Pierre Gantier, Daniel Nélias, Nicolas Boisson, Thibaut Chaise, Cyril Mauger, Pascal Dumont, Pascal Junique

► **To cite this version:**

Pierre Gantier, Daniel Nélias, Nicolas Boisson, Thibaut Chaise, Cyril Mauger, et al.. Endommagement sous impacts liquides de céramiques transparentes. 25ème Congrès Français de mécanique 2022 (CFM2022), Association française de mécanique (AFM), Aug 2022, Nantes (Cité des Congrès), France. pp.4517-4521. hal-04023770

**HAL Id: hal-04023770**

**<https://hal.science/hal-04023770>**

Submitted on 10 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Endommagement sous impacts liquides de céramiques transparentes

**P. GANTIER<sup>a,b,c</sup>, D. NÉLIAS<sup>a</sup>, B. BOISSON<sup>a</sup>, T. CHAISE<sup>a</sup>, C. MAUGER<sup>b</sup>,  
P. DUMONT<sup>c</sup>, P. JUNIQUE<sup>c</sup>**

a. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69624 Villeurbanne, France -  
daniel.nelias@insa-lyon.fr

b. Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LMFA, UMR5509, 69621 Villeurbanne, France -  
cyril.mauger@insa-lyon.fr

c. Safran Electronics & Defense, 95610 Éragny-sur-Oise, France - pascal.dumont@safrangroup.com

## Résumé :

*Les pièces aéronautiques situées au niveau des parois extérieures des avions sont soumises à de multiples contraintes environnementales. Parmi elles, les impacts liquides (pluie, brouillard, nuage) peuvent entraîner des dommages particulièrement sévères. C'est pourquoi, ils ont fait l'objet de nombreuses études depuis l'avènement des avions à réaction. L'endommagement sous impact liquide des céramiques transparentes utilisées pour des applications optiques (visée, guidage, détection) a une forme circulaire en périphérie de la zone d'impact désormais bien identifiée. Néanmoins, aucun critère ou loi d'endommagement n'a été déterminé concernant l'amorçage de cet endommagement. C'est donc l'objet de ce travail expérimental qui comprend le développement, la fabrication, la calibration, la caractérisation et l'instrumentation d'un banc d'essais. Le matériau concerné par cette étude est le sulfure de zinc (zinc sulfide ou ZnS). En parallèle, en vue d'enrichir les résultats expérimentaux, un modèle numérique CFD a été mis en place sur le logiciel commercial Fluent et permet de déterminer le champ de pression spatio-temporel appliqué par les gouttes d'eau lors d'un impact sur une cible rigide.*

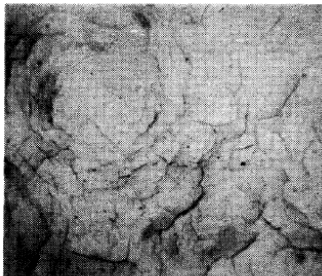
## Abstract :

*Aeronautical parts located at the outer walls of aircrafts undergo strong environmental constraints. Among them, water-drop impacts (rain, fog, cloud) can be particularly severe. That's why, they have been widely investigated since jet aircrafts have appeared. Damage due to water-drop impacts of transparent ceramics used for optical applications (targetting, guiding, detecting) has a typical well-known circular pattern. However, no damage criteria or damage law exists yet. Thus, this is the aim of this experimental research which deals with the development, the manufacturing, the calibration, the characterisation and the instrumentation of an ad hoc test bench. It will be used to study the initiation of damage due to water-drop impact on zinc sulphide. Besides, in order to complement experimental results, a CFD model has been developed with Fluent commercial software. It allows to determine the space-time pressure profile applied by a water-drop impacting a rigid target.*

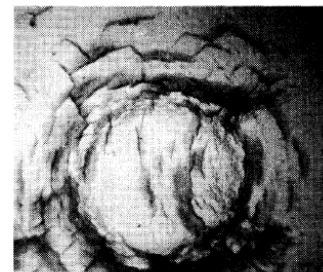
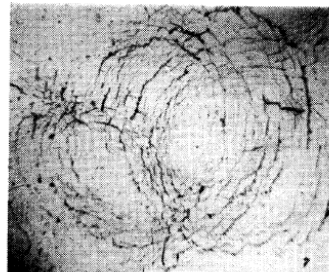
**Mots clefs : ZnS, endommagement, impacts liquides, pluvio-érosion, banc d'essai, CFD.**

# 1 Introduction

La caractérisation de l'endommagement sous impact liquide du ZnS a historiquement été largement étudiée à l'aide d'impacts de "jets d'eau". En effet, d'un point de vue expérimental, il est très compliqué de générer des impacts de gouttes d'eau liquide de forme sphérique à haute vitesse contre un solide. Seul un seul dispositif expérimental existe et permet de générer des impacts de ce type, mais uniquement de manière unitaire, ou quasi-unitaire[1]. Les nombreuses études menées à l'aide des bancs SIJA <sup>1</sup> et MIJA <sup>2</sup> ont permis de montrer la pertinence de l'utilisation de jets d'eau pour étudier les impacts liquides sur différents matériaux[2]. De plus, différentes lois permettent de déterminer des équivalences entre un jet et une goutte d'eau[3]. Par ailleurs, dans le cas d'impacts liquides dans le contexte aéronautique, il n'est pas établi que la forme des gouttes d'eau à l'instant de l'impact soit de forme parfaitement sphérique à cause de différents effets aérodynamiques et du rôle de la couche limite qui sont encore mal compris. Par conséquent, l'utilisation de jets de forme répétable, reproductible et spécifié est une pratique répandue et pertinente pour étudier les impacts liquides sur différents matériaux[4] (Figure 1).



**Figure 15.** ZnS flown on an aircraft through rain



**Figure 16.** ZnS impacted on MIJA

FIGURE 1 – Comparaison des dommages produits par un banc d'essais de type MIJA et les dommages constatés en vol (d'après [4])

La résistance à l'impact liquide du ZnS a fait l'objet de nombreuses études[5, 6, 7, 8]. En effet, ses caractéristiques optiques (en particulier sous sa forme multispectrale) en font un excellent candidat pour des fenêtres optiques fonctionnant dans les spectres infrarouge lointains et visible. Néanmoins, sa fragilité et sa faible résistance mécanique ( $R_m \approx 80MPa$ ) le rendent particulièrement vulnérable aux impacts liquides.

Si les études passées ont permis de déterminer un seuil de dommage à 300 gouttes se situant aux alentours de  $120m/s$ [8, 9], elle ne permettent pas de déterminer de critère d'endommagement et ne constituent pas non plus une loi d'endommagement. De plus, la plupart de ces études ne se focalisent pas spécifiquement sur la problématique de l'amorçage de l'endommagement mais sur un dommage d'une taille déjà importante (environ  $100\mu m$ ). Néanmoins, elles ont permis d'identifier les principales caractéristiques des endommagements observés sous impacts liquides : une succession de dommages circulaires en périphérie de la zone d'impacts. Ces dommages sont dues à de fortes contraintes de traction lors du passage des ondes de contraintes, et en particulier de l'onde de Rayleigh à l'issue de l'impact. Il est établi que les défauts de surfaces et la qualité du polissage jouent au premier ordre sur l'initiation des dommages.

1. Single Impact Jet Apparatus.  
2. Multiple Impact Jet Apparatus.

Le chargement appliqué sur un massif par un impact liquide entraîne des phénomènes dynamiques de propagation d'ondes de contraintes volumiques et surfaciques [10, 11, 12]. Cela s'explique par les variations brusques de la pression appliquée sur le massif lors d'un impact liquide notamment à cause de la compressibilité de l'eau et de l'effet *coup de bélier*.

Les travaux présentés portent sur le banc d'essais développé pour étudier les effets des impacts liquides sur du ZnS fabriqué par dépôt chimique en phase vapeur (CVD<sup>3</sup>) et ayant subi un pressage isostatique à chaud (HIP<sup>4</sup>). Le matériau initial est en cours de caractérisation (module de Young, module de Poisson, résistance mécanique, cristallographie, état de surface) par différentes méthodes (nano-indentation, flexion 4 lignes, microscopie optique, microscopie électronique).

## 2 Le banc d'essai

Le banc d'essai conçu pour ces travaux est similaire à celui développé par Airbus [13]. Il consiste à générer un jet d'eau continu, stable et cylindrique à l'aide d'une pompe haute pression (320bar) et d'une buse adaptée (Figure 2). Ce jet est ensuite coupé par un disque percé (le hacheur) pouvant tourner jusqu'à 4000tr/min. Un second disque (l'obturateur – non représenté), tournant 300 fois moins vite, permet de ne projeter contre le matériau qu'une goutte sur 300 générées par le hacheur. Cela permet de travailler avec un faible nombre d'impacts et de caractériser le matériau étudié plus finement.

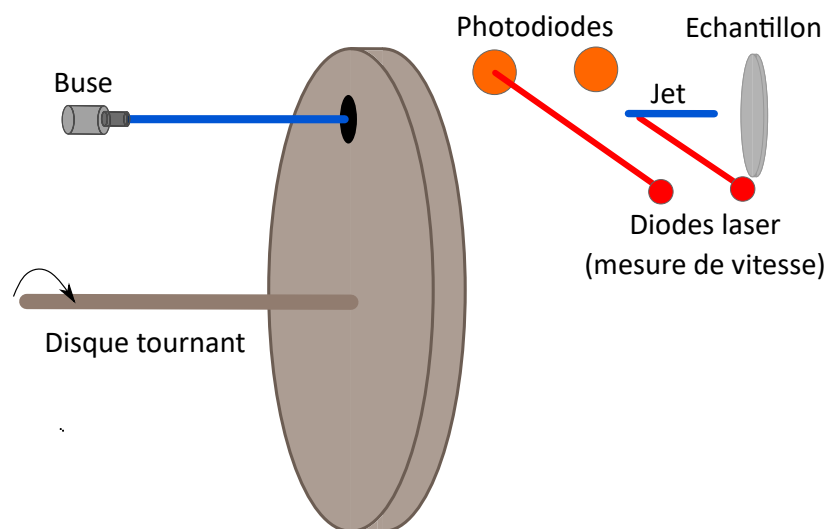


FIGURE 2 – Schéma de fonctionnement du banc d'essai

La vitesse des jets projetés est mesurée à l'aide de deux faisceaux lasers et de deux photo-diodes distantes d'une longueur connue. Les faisceaux sont traversés par les gouttes. La vitesse des jets est réglée en modifiant la pression générée par la pompe haute pression utilisée (fermeture du by-pass).

Deux platines de positionnement (non-représentées) permettent de projeter des jets d'eau sur différents points de l'échantillon et, en parallèle d'une étude microscopique, de suivre l'amorçage et la propagation

3. Chemical Vapor Deposition.

4. Hot isostatic pression.

d'un endommagement.

### 3 Modèle numérique CFD

Afin de déterminer les niveaux de pression qui s'appliquent sur un massif parfaitement rigide lorsqu'une goutte d'eau parfaitement sphérique l'impacte, un modèle numérique de mécanique des fluides a été mis en place sur le logiciel commercial *Fluent*. Il s'agit d'un modèle diphasique résolu avec la méthode VOF[14] (Figure 3) et dont la formulation temporelle est implicite. Les équations de pression et de vitesse sont couplées avec le schéma PISO[15]. L'air est supposé incompressible et l'eau compressible. Cette hypothèse permet de simplifier le problème et consiste à supposer que l'air n'intervient pas au premier ordre sur les amplitudes de pression appliquées lors d'un impact liquide.

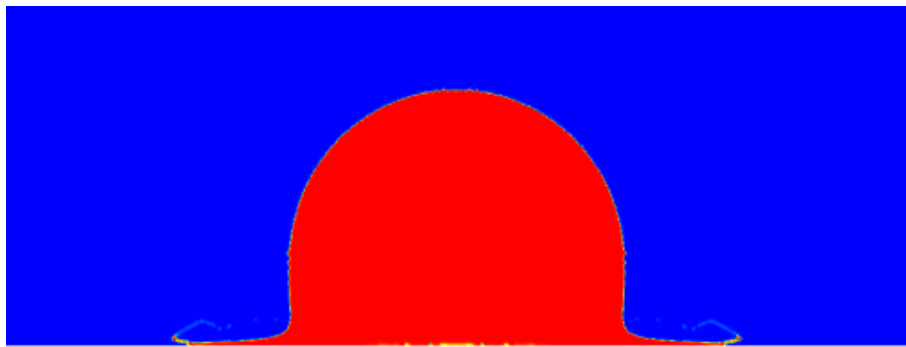


FIGURE 3 – Paramètre VOF lors de l'impact à  $100m/s$  d'une goutte d'eau sphérique de  $2mm$  de diamètre contre un massif rigide

Le modèle numérique mis en place a été comparé aux modélisations existantes, en particulier celles de Haller[10] et Marzbali[11]. Si les amplitudes déterminées par les précédents auteurs sont supérieures à celles du modèle mis en place, la cinématique et les profils de pressions sont sensiblement proches. Il est important de noter que les différences d'amplitude se concentrent autour des instants où le pic de pression intervient et qu'en considérant les pressions moyennes, les amplitudes sont très proches (Figure 4). Par ailleurs, les différences d'amplitude constatées avec ces deux auteurs sont du même ordre de grandeur que celles constatées entre l'ensemble des ressources traitant de ce sujet dans la littérature.

Aussi, il a été déterminé qu'en adimensionnant de manière appropriée les principales grandeurs, le profil de pression ne dépend pas de la taille de la goutte mais uniquement de sa vitesse (Pression :  $P^* = P/P_{cb}$  avec  $P_{cb} = \rho_0 C_0 V_0$ , pression coup de bélier donnée en fonction de la masse volumique de l'eau  $\rho_0$ , de la vitesse de propagation de l'onde de compression dans l'eau  $C_0$  et de la vitesse d'impact de la goutte  $V_0$ , rayon :  $R^* = R_0$  avec  $R_0$  rayon de la goutte impactant le massif rigide et temps :  $t^* = \frac{V_0 t}{2R_0}$ ). La pression appliquée est maximum en périphérie du contact. Le maximum de pression est très bref et très localisé.

### 4 Conclusion et perspectives

Les études doivent être poursuivies et complétées par l'étude numérique de la réponse du ZnS au champ de pression déterminé. Ce modèle permettra d'étudier différents critères d'endommagement qui seront mis en relation avec les dommages observés sur le banc d'essais. Il est d'ores et déjà acquis que la

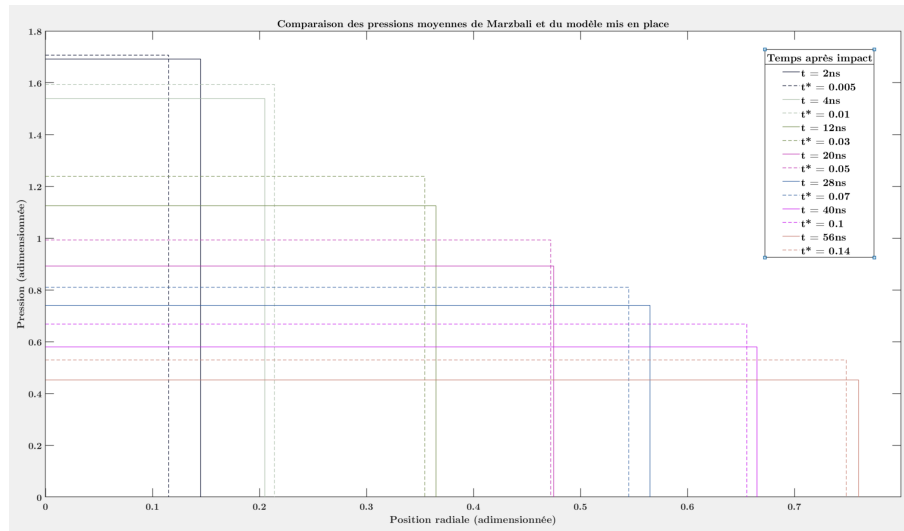


FIGURE 4 – Comparaison des pressions moyenne calculées d’après le modèle numérique et celles de Marzbali[11]

notion de défaut critique est prépondérante dans l’amorçage de l’endommagement du ZnS sous impact liquide. Si les profils de pression de deux gouttes de différentes tailles lancées à la même vitesse sont les mêmes lorsqu’ils sont adimensionnés, plus plus les gouttes seront de grandes tailles, plus la pression qu’elles appliquent sera répartie sur une grande surface et pendant une plus longue durée. Il est donc très fortement probable qu’une goutte de grande dimension soit plus critique qu’une goutte de petite dimension, à vitesse d’impact constante.

Par ailleurs, les études sur les mécanismes micro-structuraux entraînant l’apparition de dommages tout comme de potentiels effets cumulatifs en vitesse ou en taille seront poursuivies.

## Références

- [1] William F. Adler, John C. Botke, Timothy W. James, Response of infrared-transparent materials to raindrop impacts, Rapport technique, Effects Technology Incorporation, (1979) AFML-TD-79-4151.
- [2] J. E. Field, ELSI conference : invited lecture, Liquid impact : theory, experiment, applications, Wear 233-235 (1999) 1–12.
- [3] R. J. Hand, J. E. Field, D. Townsend, The use of liquid jets to simulate angled drop impact, Journal of Applied Physics, 70 (1992) 7111–7118.
- [4] C. R. Seward, C. S. J. Pickles, J. E. Field Single and multiple jet apparatus and results, Window and Dome Technologies and Materials II, 1326 (1990) 280–290.
- [5] William F. Adler, T. W. James, Analysis of water impact on zinc sulfide, Fracture mechanics of ceramics, Plenum Press, New-York, France, (1990) 3–6.
- [6] E. J. Coad, C. S. J. Pickles, C. R. Seward, G. H. Jilbert, J. E. Field, The erosion resistance of infrared transparent materials, Proceedings of the Royal Society of London A. 454, (1990) 213–238.
- [7] S. Van de Zwaag, J. E. Field, Liquid jet impact damage on zinc sulphide, Journal of Materials Science 17, (1982) 2625–2636.

- [8] C. R. Seward, E. J. Coad, C. S. J. Pickles, J. E. Field, The liquid impact resistance of a range of IR-transparent materials, *Wear* 186-187, (1995) 375–383.
- [9] C. F. Kennedy, J. E. Field, Damage threshold velocities for liquid impact, *Journal of Material Sciences* 35, (2000) 5331–5339.
- [10] K. K. Haller, Y. Ventikos, D. Poulikakos, P. Monkewitz, Computational study of high-speed liquid droplet impact, *Journal of Applied Physics* 92, (2002) 2821–2828.
- [11] Mason Marzbali, Numerical Analysis of High-speed Droplet Impingement on Elastic and Rigid Substrates, Thèse, Concordia University, (2017).
- [12] Qulan Zhou, Na Li, Wi Chen, Tongmo Xu, Shien Hui, Di Zhang Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part II : Axisymmetric solution and erosion analysis, *International Journal of Mechanical Sciences* 50, (2008) 1543–1558.
- [13] Robert Jonsson, Characterisation and Validation of a Pulsating Jet Erosion Test, Thèse de master, Lulea University of Technology, (2007).
- [14] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics* 39, (1981) 201–225.
- [15] R. Issa, Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, *Journal of Computational Physics*, (1986) 40–65.