



**HAL**  
open science

# Interaction d'un choc à Mach 4 avec un train de gouttes d'eau liquide

Florent Viot, Corentin Loiseau, Jean-Luc Rullier, David Hébert, M. Boustie

## ► To cite this version:

Florent Viot, Corentin Loiseau, Jean-Luc Rullier, David Hébert, M. Boustie. Interaction d'un choc à Mach 4 avec un train de gouttes d'eau liquide. CFM 2025 - 26e Congrès Français de Mécanique, Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3 - UMR CNRS 7239), Aug 2025, Metz, France. ⟨hal-05313037⟩

**HAL Id: hal-05313037**

**<https://hal.science/hal-05313037v1>**

Submitted on 14 Oct 2025

**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.



HAL Authorization

# Interaction d'un choc à Mach 4 avec un train de gouttes d'eau liquide

F. VIROT<sup>a</sup>, C. LOISEAU<sup>b</sup>, J-L. RULLIER<sup>b</sup>, D. HEBERT<sup>b</sup>, M. BOUSTIE<sup>a</sup>

a. Institut PPRIME UPR CNRS 3346, 1 av. Clément Ader, 86360 Chasseneuil du Poitou

b. CEA Cesta, 15 av. des sablières, 33000 Le Barp

## Résumé :

*L'objet de ces travaux est d'étudier le comportement d'un train de gouttes d'eau liquide après le passage d'un choc à Mach 4. Les gouttes sont produites par la déstabilisation d'un filet d'eau traversant un orifice ou une aiguille hypodermique. La distribution de la taille des gouttes est plutôt monodisperse et le diamètre des gouttes est varié entre 150  $\mu\text{m}$  et 980  $\mu\text{m}$ . Un tube à détonation est mis en œuvre pour générer une onde de choc dans l'air. Le processus de fragmentation de la goutte est observé par striescopie sur des longues durées relativement au temps de Rayleigh grâce à une caméra ultra-rapide. Les nouveaux résultats avec les petites gouttes étendent les durées d'observation jusqu'à  $T \approx 17,5$ . Par ailleurs, la comparaison avec les résultats antérieurs où les gouttes étaient isolées, suspendues par l'intermédiaire de fils fins et avaient des diamètres initiaux  $d_{g0} \geq 400 \mu\text{m}$ , montre une très bonne cohérence.*

## Abstract :

*The aim of this work is to study the behavior of a liquid water drops train after the passage of a shockwave propagating at Mach number 4. The drops are produced by the destabilization of a stream of water passing through an orifice or a hypodermic needle. The droplet size distribution is rather monodisperse and the drop diameter is varied between 150  $\mu\text{m}$  and 980  $\mu\text{m}$ . A detonation tube is used to generate a shockwave in the air. The droplet fragmentation process is observed by schlieren imaging over long timescales relative to the Rayleigh time using an ultra-fast camera. The new results with small drops extend the observation times to  $T \approx 17.5$ . Furthermore, the comparison with the previous results where the drops were isolated, suspended via fine wires and had initial diameters  $d_{g0} \geq 400 \mu\text{m}$ , shows very good consistency.*

**Mots clefs : choc, écoulement supersonique, diphasique, gouttes, fragmentation**

## 1 Introduction

Les domaines dans lesquels les écoulements diphasiques interagissent avec des chocs sont nombreux. Qu'il s'agisse de la sécurité industrielle lorsque des brouillards d'eau sont répandus pour atténuer une explosion [1] ou des applications pour le transport avec l'injection de carburant dans une chambre de

moteur à détonation rotative [2], les phénomènes physiques en jeu sont complexes et nécessitent d'être davantage compris et modélisés.

Parmi tous les travaux qui ont été publiés sur l'interaction entre une onde de choc et une goutte d'eau liquide, peu se sont focalisés à des nombres de Mach de choc élevés ( $M_s \geq 4$ ) où les régimes d'écoulement sont supersoniques [3]-[8]. Les travaux sont encore plus rares avec des gouttes de petits diamètres ( $d_{g0} \leq 400 \mu\text{m}$ ) et/ou avec des longs temps d'observation.

L'objet de cette étude est donc d'explorer le phénomène d'atomisation d'une goutte par une onde de choc se propageant à Mach 4 sur des petites gouttes et des temps longs. Dans nos travaux antérieurs, les gouttes étaient suspendues par deux fils et cela ne nous permettait pas d'en étudier les gouttes en dessous de  $400 \mu\text{m}$ . Par conséquent, des générateurs de train de gouttes ont été testés et mis au point pour s'adapter au dispositif expérimental. Les techniques expérimentales sont d'abord décrites avant de présenter les résultats.

## 2 Description du montage expérimental

### 2.1 Tube à choc généré par détonation

Un tube à détonation de 8 m de long et de 92 mm de diamètre intérieur est utilisé pour générer des chocs dans une section d'étude remplie d'air à la pression atmosphérique et à température ambiante (cf Fig. 1). Une détonation est initiée à l'extrémité gauche du tube dans un mélange gazeux  $\text{H}_2/\text{O}_2$  stœchiométrique facilement détonable. L'onde de détonation qui se propage vers la droite se transmet dans un autre mélange réactif dilué par de l'hélium (mélange  $\text{H}_2+0.5 \text{O}_2+ 3.33 \text{He}$ ). Les pressions de chacune des sections motrices sont ajustées pour obtenir une onde de choc aux caractéristiques désirées au niveau de la chambre d'expérience. Cette dernière a une section carrée de  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  et un tronçon de transition de 150 mm de long en amont effectue le changement de forme entre le tube rond et la chambre carrée.

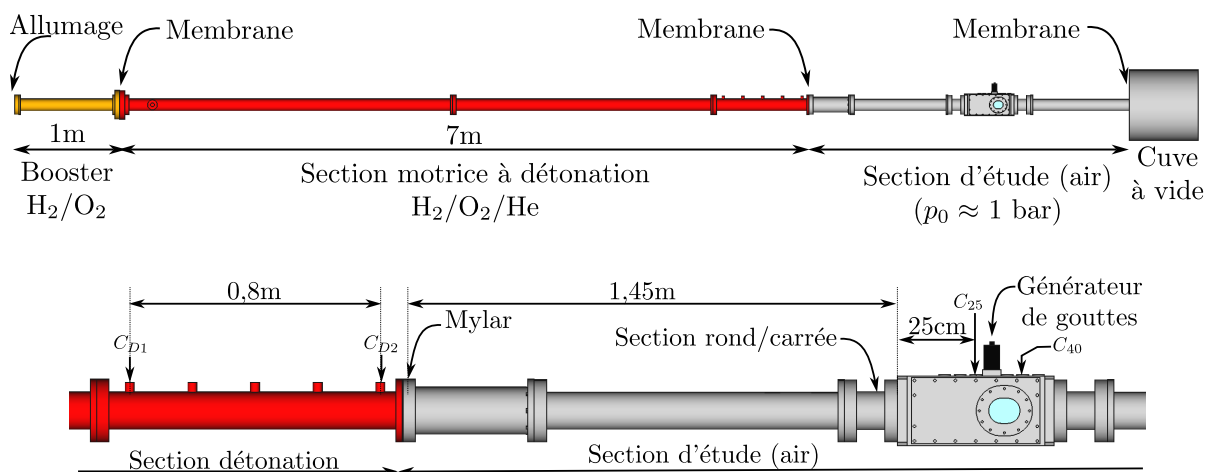


FIGURE 1 – Vue d'ensemble du tube à choc généré par détonation de l'institut PPRIME (haut) et vue détaillée autour de la section d'étude (bas).

Quatre capteurs piezoélectriques (Kistler 603B) mesurent la pression le long du dispositif : deux à la fin de la section motrice et deux au niveau de la zone d'intérêt dans la chambre d'étude. Connaissant les distances entre chaque capteur, les vitesses moyennes de propagation de la détonation d'une part

et de l'onde de choc, d'autre part, peuvent être calculées. Les capteurs de pression sont reliés à une centrale d'acquisition NI PXIe 5105 via des amplificateurs de charges Kistler 5018. Le déclenchement de l'enregistrement des signaux est réalisé sur le front montant du capteur  $C_{25}$  en amont de la zone d'intérêt ; la centrale propage instantanément un signal de déclenchement pour les caméras rapides.

Un générateur de train de gouttes est installé entre les capteurs  $C_{25}$  et  $C_{40}$ , il sera décrit ultérieurement.

## 2.2 Montage optique

La visualisation du phénomène d'atomisation est réalisée avec une caméra Shimadzu HPV-X2 à une fréquence de 1 MHz ou 2 MHz avec des temps d'exposition de 200 ns sur un montage striaoscopique schématisé sur la figure 2. Un faisceau collimaté est produit à partir de l'image d'une fente placée au foyer d'un miroir parabolique  $M_1$  ; une LED verte alimentée en continu illumine la fente par un condenseur constitué par les lentilles  $L_1$  et  $L_2$ . Le faisceau lumineux passe dans la chambre d'expérience à travers de larges hublots épais en BK7. Un couteau est placé aux foyers des lentilles  $L_3$  et  $L_4$  pour réaliser la striaoscopie. Avec les focales choisies, la résolution des images sur le capteur CMOS est de  $6,57 \pm 0,04$  pxl/mm fournissant un champ de visualisation jusqu'à 53 mm de large.

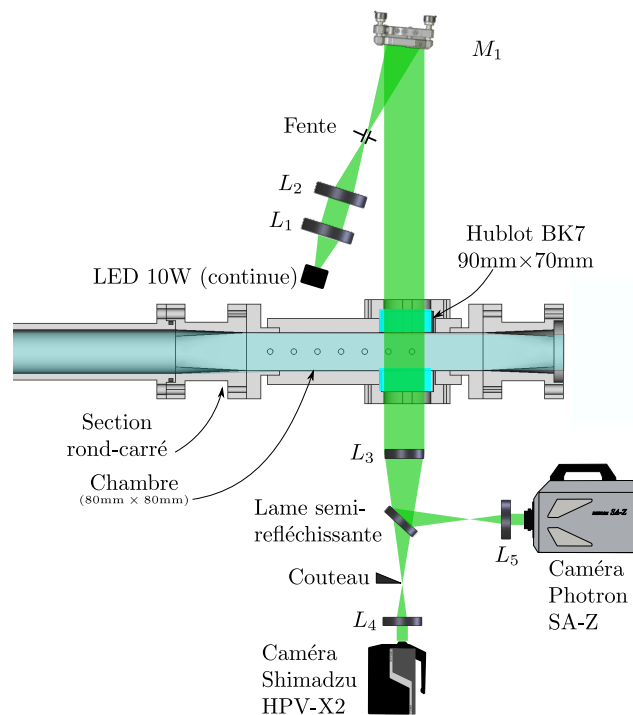


FIGURE 2 – Schéma de la configuration striaoscopique utilisée.

Le chemin optique est séparé par une lame semi réfléchissante afin d'installer une seconde caméra, une Photron SA-Z, permettant la surveillance du bon établissement du train de gouttes et l'enregistrement des caractéristiques (diamètre  $d_{g0}$ ) des gouttes juste avant l'arrivée du choc. La résolution de cette caméra est de  $32,5 \pm 0,3$  pxl/mm.

## 2.3 Systèmes de génération de train de gouttes

Les trains de gouttes d'eau sont obtenus en débitant de l'eau à travers un capillaire. L'eau pure, déminéralisée, contenue dans une seringue est injectée au moyen d'un pousse seringue conçu spécifiquement

pour l'expérience, le piston de la seringue est translaté grâce à un moteur pas-à-pas et le débit d'eau est réglé à distance par un ordinateur monocarte Raspberry Pi en faisant tourner le moteur plus ou moins rapidement (cf Fig. 3).

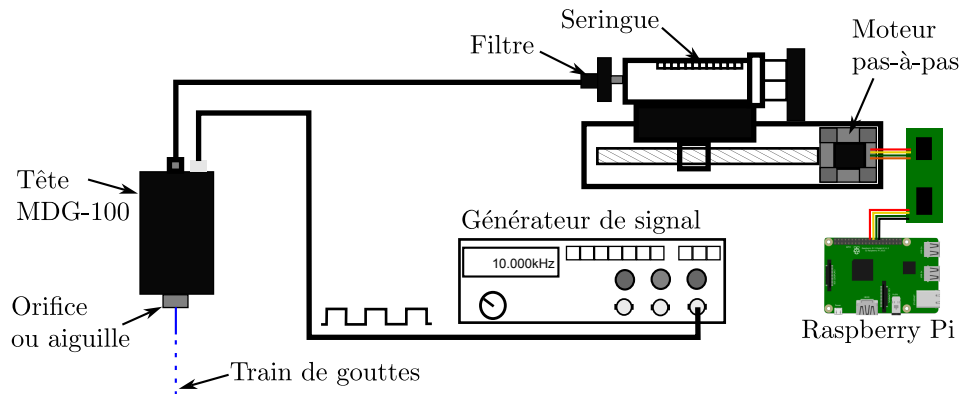


FIGURE 3 – Schéma des systèmes de génération de gouttes.

Deux types de capillaire sont exploités selon le souhait d'obtenir des grosses gouttes ( $d_g > 500 \mu\text{m}$ ) ou des petites gouttes ( $100 \mu\text{m} \leq d_g \leq 500 \mu\text{m}$ ) : une aiguille hypodermique fine (gauge 32/gauge 28) possédant un diamètre interne de  $140 \mu\text{m}/190 \mu\text{m}$  ou, respectivement, un orifice calibré (type sténopé optique de précision en acier inoxydable) dont le diamètre du trou est de  $35 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$  ou  $100 \mu\text{m}$ . Lors de l'utilisation d'orifices calibrés, des céramiques piezo-électriques sont mises en vibration pour aider la déstabilisation du jet en sortie afin de créer des gouttes avec une distribution la plus monodisperse possible. Cette technique, habituellement utilisée dans les systèmes de calibration d'interféromètres à phase doppler (PDI), a été mise en œuvre en adaptant sur la chambre d'expérience le générateur MDG-100 commercialisé par la société TSI. Pour vibrer, les céramiques sont reliées à un générateur de signal périodique carré d'amplitude  $\pm 16 \text{ V}$ . Le diamètre des gouttes théorique  $d_{g_{th}}$  dépend alors du débit d'eau  $Q$  et de la fréquence de vibration  $f$  selon la relation :

$$d_{g_{th}} = \sqrt[3]{\frac{6Q}{\pi f}} \quad (1)$$

Le fonctionnement nominal du générateur MDG produit des gouttes très régulièrement espacées et avec une distribution mono-disperse des diamètres. Dans cette étude, le fonctionnement n'est pas parfaitement dans la zone de stabilité du système, ce qui produit des variations dans le diamètre et l'espacement des gouttes.

## 2.4 Conditions expérimentales

Dans toutes les expériences, l'air est dans les conditions ambiantes ( $P_0 = 1,008 \pm 0,007 \text{ bar}$  et  $T_0 = 27,5 \pm 1,0 \text{ °C}$ ) ; les pressions initiales des gaz des sections motrices sont ajustées pour atteindre une onde de choc à Mach 4, les nombres de Mach obtenus sont  $M_s = 3,94 \pm 0,03$ . De plus, l'eau est injectée avec un débit  $Q = 76 \text{ mL/h}$ .

Le tableau 1 reporte les caractéristiques des essais : la vitesse de propagation du choc  $V_s$ , le nombre de Mach  $M_s$  et les propriétés de l'air en aval du choc droit (température  $T_{PS}$ , pression  $P_{PS}$ , masse volumique  $\rho_{PS}$  et vitesse matérielle  $u_{PS}$ ).

Numéro d'essai	$V_s$ (m/s)	$M_s$ ( $\mu\text{m}$ )	méthode de génération	$T_{PS}$ (K)	$P_{PS}$ (bar)	$\rho_{PS}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$u_{PS}$ (m/s)
10	1380	3,97	MDG $\phi=100\ \mu\text{m}$ $f=10\ \text{kHz}$	1138	18,5	5,65	1091
11	1374	3,95	MDG $\phi=100\ \mu\text{m}$ $f=10\ \text{kHz}$	1132	18,3	5,62	1092
13	1369	3,94	MDG $\phi=50\ \mu\text{m}$ $f=3\ \text{kHz}$	1125	18,4	5,66	1084
14	1386	3,97	MDG $\phi=35\ \mu\text{m}$ $f=1\ \text{kHz}$	1147	18,7	5,67	1098
15	1381	3,97	Aiguille $\phi=140\ \mu\text{m}$	1138	18,7	5,70	1095
16	1377	3,96	Aiguille $\phi=140\ \mu\text{m}$	1134	18,6	5,66	1098
18	1362	3,91	aiguille $\phi=190\ \mu\text{m}$	1117	18,3	5,67	1078

TABLE 1 – Tableau de synthèse des essais réalisés

Plusieurs gouttes sont observables dans le champ de la camera. Le tableau 2 réunit l'ensemble des gouttes étudiées, c'est à dire celles dont les distances par rapport aux gouttes adjacentes sont suffisamment éloignées afin que les brouillards ne se mélangent pas (cf Fig. 4). Le temps de Rayleigh  $t_R = \frac{d_{g0}}{u_{PS}} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_{PS}}}$  et le nombre de Weber  $We = \frac{\rho_{PS} u_{PS}^2 d_{g0}}{\sigma}$  sont également précisés, ils sont calculés avec  $\rho_l = 1000\ \text{kg/m}^3$  et la tension de surface  $\sigma = 72\ \text{mN/m}$  pour l'eau.

	$d_{g0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$t_R$ ( $\mu\text{s}$ )	We $\times 1000$		$d_{g0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$t_R$ ( $\mu\text{s}$ )	We $\times 1000$		$d_{g0}$ ( $\mu\text{m}$ )	$t_R$ ( $\mu\text{s}$ )	We $\times 1000$
13-G8	150	1,8	13,9	11-G4	400	4,9	37,3	16-G2	680	8,3	63,9
14-G1	150	1,8	14,4	10-G2	400	4,9	37,8	18-G3	710	9,1	64,6
14-G2	180	2,2	17,2	10-G5	420	5,1	39,7	15-G1	730	8,8	69,2
10-G6	200	2,5	18,9	10-G7	440	5,3	41,6	15-G4	730	8,8	69,2
14-G3	220	2,7	21,1	11-G5	440	5,4	41,1	15-G5	740	8,9	70,2
13-G3	270	3,3	24,9	11-G9	450	5,5	42	15-G2	760	9,2	72,0
13-G6	330	4,0	30,5	10-G8	510	6,2	48,2	15-G3	760	9,2	72,0
13-G2	340	4,2	31,4	16-G3	550	6,7	51,7	18-G1	780	9,6	70,9
13-G1	350	4,3	32,3	16-G4	550	6,7	51,7	18-G4	910	11,2	82,8
13-G7	400	4,9	36,9	16-G1	610	7,5	57,3	18-G2	980	12,1	89,1

TABLE 2 – Tableau de synthèse des gouttes étudiées.

Vus les grands nombres de Weber ( $We \geq 10^4$ ), le régime de fragmentation est de type catastrophique d'après la classification proposée par Pilch [9].

### 3 Résultats

#### 3.1 Description générale de l'atomisation des gouttes

La figure 4 montre une sélection d'images extraites de deux films obtenus avec la caméra ultra-rapide Shimadzu HPV-X2. Les gouttes obtenues avec un orifice calibré (à gauche) sont plus petites que celles obtenues avec une aiguille hypodermique (à droite).

La ligne verticale en pointillée blanche représente la position initiale des gouttes. A l'exception d'une petite goutte de  $200\ \mu\text{m}$  (10-G6), les gouttes sont alignées et ont des diamètres comparables autour de  $400\ \mu\text{m}$  pour l'essai à gauche et autour de  $750\ \mu\text{m}$  pour l'essai à droite. Sur chaque image, le temps après le passage du choc sur la goutte,  $t$ , ainsi que le temps adimensionné par le temps de Rayleigh,  $T = t/t_R$ , sont indiqués (secondes valeurs pour la goutte 10-G6).

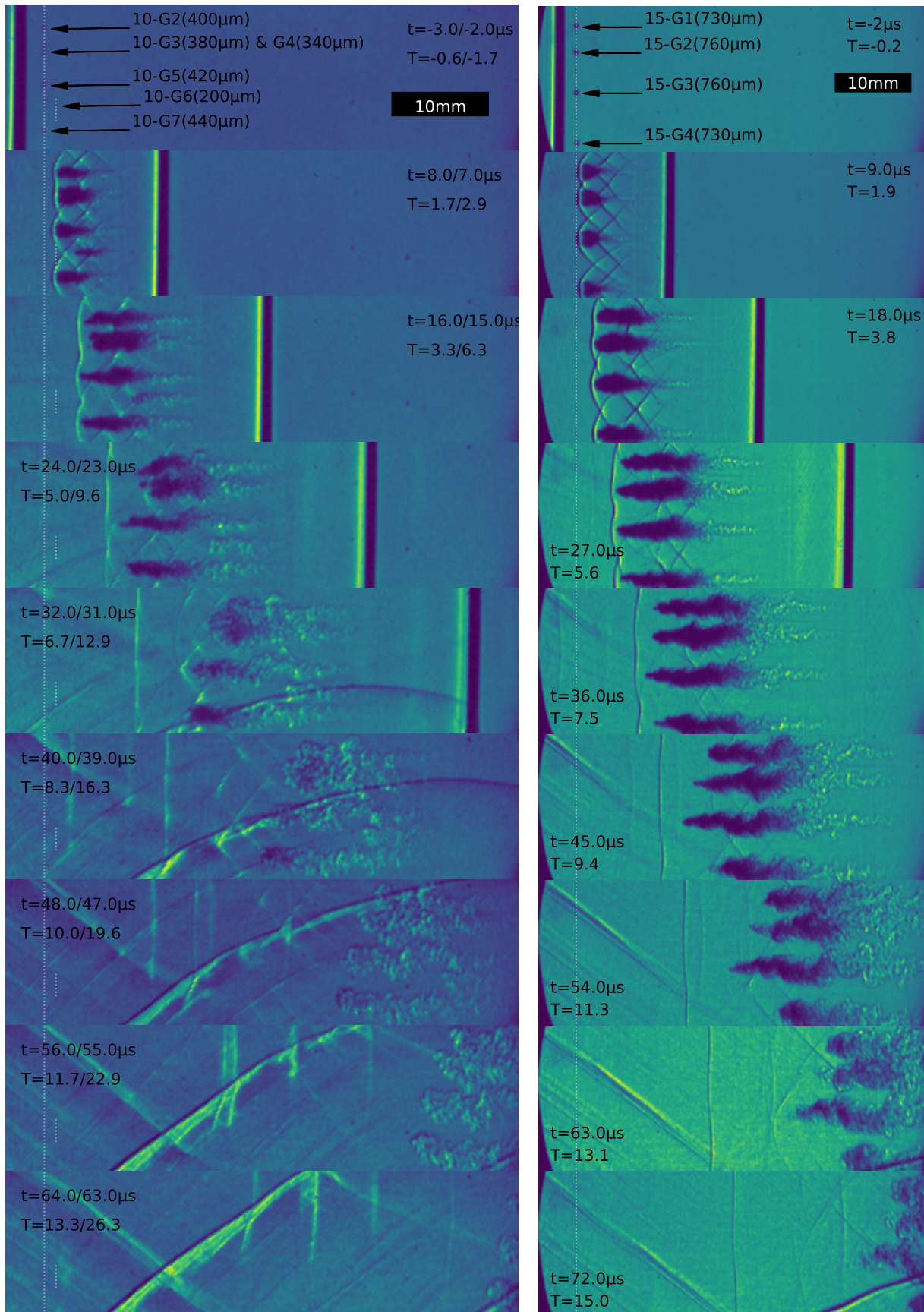


FIGURE 4 – Séquences d’images de l’interaction entre un train de gouttes et une onde de choc se propageant à Mach 4. Les trains de gouttes sont obtenus avec le générateur MDG100 avec un orifice de 100 μm (essai 10, à gauche) et une aiguille hypodermique (essai 15 à droite).

L'onde de choc incidente, droite, est visible sur les 4-5 premières images de chaque essai. A la suite du passage du choc, les gouttes sont entourées d'un épais nuage opaque qui s'éclaircit progressivement : dans les premiers instants (jusqu'à  $T \approx 1$ ), les gouttes subissent les efforts aérodynamiques de l'écoulement de gaz les contournant et elles se déforment en s'allongeant selon la verticale d'environ  $3d_{g0}$  ; l'écoulement de gaz à la surface des gouttes génère des microgouttelettes qui sont emportées dans les sillages derrière les gouttes. La présence d'une multitude de microgouttelettes dévie le faisceau lumineux collimaté empêchant toute visualisation à l'intérieur du nuage où la fragmentation de la goutte mère en gouttes filles peut survenir. L'éclaircissement progressif témoigne de la diminution de la densité en microgouttelettes qui s'évaporent.

L'écoulement supersonique derrière l'onde de choc induit un choc courbe attaché à la goutte/au nuage et qui se détache à mesure que la goutte/le nuage accélère et prend de la vitesse. Les chocs courbes devant chacune des gouttes fusionnent et apparaissent comme une seule ligne plus ou moins ondulée selon l'espacement vertical existant entre les gouttes.

Une onde de choc, oblique, courbe, arrivant par le bas, est visible dans les dernières images. Elle provient de la surépaisseur d'une flaque d'eau - plus ou moins importante - qui s'est constituée sur le fond de la chambre d'expérience avant d'atteindre un régime de fonctionnement permanent. Nous n'avons pas trouvé d'effet notable de cette onde sur les phénomènes observés.

Il apparaît nettement, en comparant les deux essais, que les phénomènes d'atomisation sont semblables pour les petites et les grosses gouttes mais que l'éclaircissement du brouillard - en partie due à l'évaporation - est d'autant plus rapide que le diamètre des gouttes est petit.

### 3.2 Répétabilité des essais

La méthode de génération des chocs mise en œuvre par le tube à choc généré par détonation fournit une excellente reproductibilité des conditions d'un essai à un autre. Ceci a déjà pu se voir dans la très faible variabilité des nombres de Mach obtenus et peut également se vérifier sur les signaux de pression des capteurs installés sur la chambre d'expérience et qui sont tracés sur la figure 5 pour les six essais. Les courbes de couleur vert-bleu correspondent au capteur  $C_{25}$  qui sert de déclenchement (donc de référence

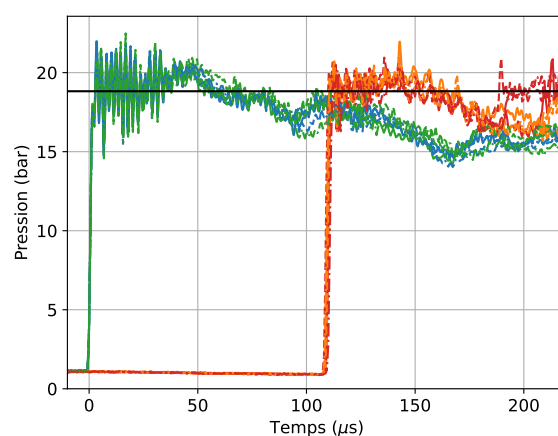


FIGURE 5 – Signaux de pression enregistrés au niveau de la surface supérieure de la chambre d'expérience (capteurs  $C_{25}$  et  $C_{40}$ ). Superposition des signaux des six essais. La distance séparant les deux capteurs de la chambre est de 150 mm.

temporelle) alors que les courbes rouge-orange correspondent au capteur  $C_{40}$ ; la ligne horizontale noire correspond au niveau de pression calculé par les relation d'un choc droit se propageant à Mach 4. Pour chaque capteur, les courbes des essais se superposent. Le signal du capteur  $C_{25}$  présente des oscillations plus importantes derrière le saut de pression que le capteur  $C_{40}$ ; ces oscillations sont associées aux vibrations mécaniques du montage du capteur dans son support. Par ailleurs, il apparaît que la pression se maintient bien pendant  $75 \mu\text{s}$  après le passage du choc, ce qui correspond à la durée maximale d'observation du phénomène sur les enregistrements cinématographiques.

Les graphiques de la figure 6 montrent l'évolution du front de goutte pour deux catégories de diamètre de goutte  $d_{g0}$ . Le front de goutte est défini par la partie la plus à gauche de la goutte, du nuage de gouttelettes ou des résidus de ce dernier. Les déplacements indiquent une phase initiale où l'accélération est constante conformément aux travaux antérieurs [7], [8] puis, l'accélération diminue et le déplacement est linéaire ou quasi-linéaire.

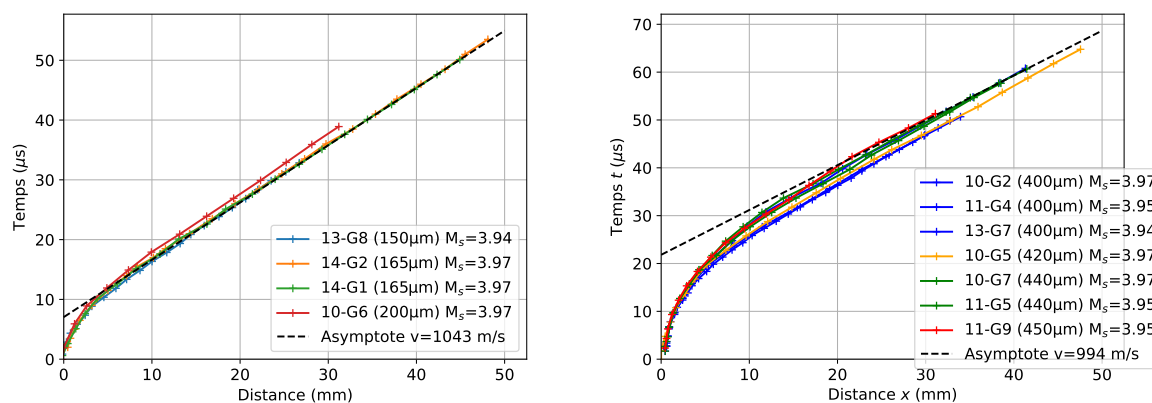


FIGURE 6 – Déplacements des fronts de goutte en fonction du temps pour des gouttes de diamètre  $d_{g0} \leq 200 \mu\text{m}$  (gauche) et de diamètre autour de  $d_{g0} = 425 \mu\text{m}$  (droite).

La répétabilité des essais peut être appréciée en comparant les déplacements des gouttes de même taille sur le même essai ou d'un essai à l'autre (par exemple sur le graphique de gauche); pour les gouttes de diamètre  $d_{g0} \approx 425 \mu\text{m}$ , les déplacements se superposent jusqu'à  $t \leq 20 \mu\text{s}$  et une légère dispersion apparaît ensuite.

Pour les petites gouttes ( $d_{g0} \leq 165 \mu\text{m}$ ), un comportement asymptotique linéaire indique une vitesse de déplacement de  $1043 \text{ m/s}$  qui correspond à  $95\%$  de la vitesse du gaz choqué calculée par les relations de choc droit. En revanche, une véritable tendance linéaire est plus délicate à assurer pour les gouttes de  $425 \mu\text{m}$ ; il faudrait poursuivre l'observation sur une plus grande distance et sur des temps plus longs, la vitesse de déplacement du front n'est, au mieux, qu'à  $90\%$  de la vitesse de l'écoulement.

### 3.3 Adimensionnement des temps et des positions des fronts des nuages des gouttes

Ainsi que le montre le graphique de gauche de la figure 7, les déplacements des fronts de goutte sont d'autant plus lents que la goutte est grosse. Il est alors coutume d'adimensionner temps et espace par le temps de Rayleigh et le diamètre initial de la goutte, respectivement [9]. Les courbes de déplacement des fronts de goutte se superposent parfaitement, quelques soient les diamètres de gouttes, dans le graphique  $T = t/t_R$  en fonction de  $X = x/d_{g0}$  (Fig. 7 droite).

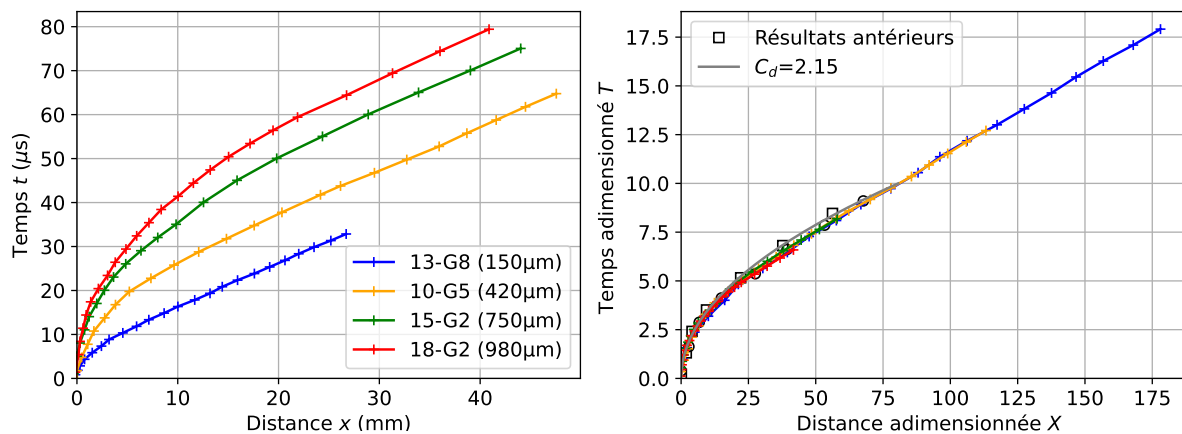


FIGURE 7 – Déplacements des fronts de gouttes en fonction du temps et selon la taille des gouttes. Echelles spatiale et temporelle absolues (à gauche) et adimensionnées (à droite). Résultats antérieurs [8].

Par ailleurs, il apparait que les résultats obtenus sont tout à fait cohérents avec les travaux précédents[8] qui ont été réalisés pour des gouttes suspendues sur fil, avec des diamètres  $d_{g0} \in \{430 \mu\text{m}, 630 \mu\text{m}, 850 \mu\text{m}\}$  et pour des nombres de Mach variant entre 4,1 et 4,47.

En réalisant de nouvelles expériences avec des petites gouttes, la gamme d’observation du phénomène a été augmentée jusqu’à  $T = 17,5$ . Dans les premiers instants, le déplacement adimensionné  $X$  peut s’exprimer avec le temps adimensionné  $T$  selon la relation  $X = \frac{3}{8}C_d T^2$  avec  $C_d = 2,15$ . Aux temps longs, au fur et à mesure que les gouttes ou résidus de gouttes atteignent la vitesse de l’écoulement, l’accélération diminue et un déplacement adimensionné linéaire du front de goutte est obtenu.

## 4 Conclusion

Des nouvelles expériences ont été réalisées pour étudier l’interaction entre une onde de choc se propageant à Mach 4 et un train de goutte d’eau liquide. Par la conception et l’adaptation d’un nouveau système d’injection de gouttes, le tube à choc généré par détonation a été utilisé sur des train de gouttes dont le diamètre initial a été varié entre  $150 \mu\text{m}$  et  $980 \mu\text{m}$ . La distribution des diamètres de goutte est plutôt monodisperse.

Plusieurs gouttes sont observables sur chaque essai et l’écartement entre les gouttes composant la colonne de gouttes apparait suffisant pour ne pas considérer d’effet d’interaction entre les gouttes tant que le nuage environnant la goutte ne se mélange pas avec celui d’une goutte adjacente.

La comparaison de ces expériences avec les résultats antérieurs, obtenus avec des gouttes isolées, suspendues par l’intermédiaire de fils fins et avaient un diamètre initial  $d_{g0} \geq 400 \mu\text{m}$  montre une très bonne cohérence. Notamment, les courbes de déplacement adimensionnées par le diamètre initial de la goutte d’une part et par le temps de Rayleigh d’autre part, se superposent. Les gouttes de diamètre inférieur à  $165 \mu\text{m}$  permettent la visualisation du processus de fragmentation complet jusqu’à la disparition du liquide. Au début de son interaction avec l’écoulement, la goutte (mère) subit une accélération constante accompagnée des mécanismes de déformation, d’épluchage et de fragmentation (création de gouttes filles), puis son accélération diminue progressivement jusqu’à s’annuler. Les résidus de goutte s’évaporent jusqu’à ce que le brouillard atteigne une vitesse proche de celle de l’écoulement.

## Références

- [1] A. KOTCHOURKO, J. MOHASCI, A. LELYAKIN, Z. XU et T. JORDAN, “Study of attenuation effect of water droplets on shockwaves from hydrogen explosion,” in *proceeding of ICHS 2021, Scotland*, Hydrogen Knowledge Centre, 2021.
- [2] M. SALVADORI, A. PANCHAL et S. MENON, “Simulation of liquid droplets combustion in a rotating detonation engine,” *Proceedings of the Combustion Institute*, t. 39, n° 3, p. 3063-3072, 2023.
- [3] W. G. REINECKE et W. L. MCKAY, “Experiments on water drop breakup behind Mach 3 to 12 shocks.,” Avco Corp., Wilmington, Mass. Avco Government Products Group, rapp. tech. SC-CR-70-6063, 1969.
- [4] W. REINECKE et G. WALDMAN, “Shock layer shattering of cloud drops in reentry flight,” in *13<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting*. 1975.
- [5] N. A. JAFFE, “Experimental Investigation of the Interaction between Strong Shock Waves and Water Droplets,” Acurex Corp, rapp. tech. 75-156, 1975.
- [6] J. P. BARBER, “Water drop breakup/impact damage thresholds,” Dayton Univ., OH., rapp. tech., 1976.
- [7] D. HÉBERT, J.-L. RULLIER, J.-M. CHEVALIER, I. BERTRON, E. LESCOUTE, F. VIROT et H. EL-RABII, “Investigation of mechanisms leading to water drop breakup at Mach 4.4 and Weber numbers above  $10^5$ ,” *SN Applied Sciences*, t. 2, n° 1, p. 69, 2019.
- [8] F. VIROT, G. TYMEN, D. HÉBERT, J.-L. RULLIER et E. LESCOUTE, “Experimental investigation of the interaction between a water droplet and a shock wave above Mach 4,” *Shock Waves*, t. 33, n° 5, p. 369-383, 2023.
- [9] M. PILCH et C. ERDMAN, “Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop,” *International Journal of Multiphase Flow*, t. 13, n° 6, p. 741-757, 1987.