

Crédit photo : H. Bonnard / P'

## ***ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES EFFETS DE L'AÉRATION SUR LES IMPACTS DE JET AÉRÉ***

**B. BERKANE<sup>(1)</sup>, G. PERRET<sup>(1)</sup>, G. PINON<sup>(1)</sup>, H. HAMDANI<sup>(2)</sup>,  
B. DURET<sup>(2)</sup>, J. REVEILLON<sup>(2)</sup>, F-X. DEMOULIN<sup>(2)</sup>**

*belaid.berkane@univ-lehavre.fr; gaele.perret@univ-lehavre.fr; gregory.pinon@univ-lehavre.fr;  
hamdanih@coria.fr; duret@coria.fr; julien.reveillon@coria.fr; demoulin@coria.fr*

<sup>(1)</sup>Normandie Univ, UNILEHAVRE, UMR 6294 CNRS, LOMC 76600 Le Havre, France

<sup>(2)</sup>Normandie Univ, UNIROUEN, UMR 6614 CNRS, CORIA 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray, France

### **Résumé**

L'étude de l'impact entre une structure rigide et l'eau a suscité l'intérêt de nombreuses recherches ces dernières années. Cette problématique concerne diverses applications d'ingénierie et particulièrement dans le domaine de l'ingénierie navale (énergies renouvelables, applications marines, etc.). Des études sur ce sujet ont montré que la pression d'impact et la force associée sont liées au taux d'aération. Alors que ce phénomène survient le plus souvent lors d'impacts de vague déferlante sur les structures côtières, l'étude précise de ce phénomène est très complexe du fait des nombreux paramètres en présence. La présente étude se focalise sur une configuration académique idéalisée pour étudier les effets de l'aération lors de l'impact d'un jet sur une plaque plane circulaire. La vitesse d'impact, la taille des bulles ainsi que le taux d'aération sont des paramètres étudiés.

### **Summary**

The study of the impact between a rigid structure and water has attracted the interest of many researches these last years. This problem concerns various engineering applications and particularly in the field of naval engineering (renewable energies, marine applications, etc.). Studies on this topic have shown that the impact pressure and the associated force are related to the aeration rate. While this phenomenon occurs most often during breaking wave impacts on coastal structures, the precise study of this phenomenon is very complex due to the many parameters involved. The present study focuses on an idealized academic configuration : the effects of aeration during the impact of an aerated water jet on a circular flat plate. The impact speed, the bubbles size and the aeration rate are studied parameters.

## I – Introduction

Les problèmes d’impacts hydrodynamiques sont fréquemment rencontrés dans plusieurs domaines et plus particulièrement dans l’industrie navale et côtière. L’impact récurrent des vagues sur les structures de protection côtières ainsi que les récupérateurs d’énergie tels les mats d’éoliennes peut provoquer des endommagements sur ces structures. Dans l’industrie aéronautique, où dans certaines situations d’urgence, les avions civils ou militaires doivent amerrir sur l’eau pour évacuer. Afin d’avoir une compréhension fine des impacts sur les ouvrages hydrauliques, le phénomène a été étudié par des approches expérimentales, théoriques et numériques depuis plusieurs décennies. Pour clarifier les propriétés des impacts d’eau, ces études se basent sur l’analyse de la pression et de l’impulsion lors de l’impact. Les premières recherches sur les impacts solide-eau remontent aux travaux pionniers de von Karman (1929) [1] sur le problème de l’amerrissage forcé des avions. Pour une structure à fond plat, il a proposé que la pression maximale soit liée à la densité de l’eau  $\rho$ , à la vitesse du son dans l’eau  $c$  et à la vitesse d’impact  $u$  :

$$P_{max} = \rho u c \quad (1)$$

Celle-ci est généralement appelée pression acoustique. En pratique, la pression acoustique maximale ne se produit jamais, car lors de l’entrée dans l’eau, les plaques plates retiennent généralement l’air sous leur surface inférieure ce qui a pour conséquence la déformation de la surface libre. La théorie de Wagner (1932)[2] a démontré une meilleure prise en compte de la masse ajoutée du fluide en modélisant la remontée locale du fluide donc une meilleure prise en compte de la déformation de la surface libre. L’air retenue est fortement comprimé et forme une couche très mince à mesure que la structure s’approche de la surface de l’eau.

Pour les configurations réelles, les enregistrements des efforts appliqués par les vagues sur la côte de Dieppe par de Rouville et al. (1938) [3] ont signalé une grande variabilité spatiale et temporelle des signaux de pression provenant de vagues apparemment similaires. Ceci a motivé Bagnold (1939) [4] à proposer un modèle de poche d’air pour décrire la physique des pressions impulsives extrêmement élevées. Ce modèle est basé sur le processus de compression adiabatique d’une mince poche d’air en forme de lentille piégée entre la vague déferlante et la structure. Verhagen et al. 1967 [5] ont montré à la fois théoriquement et expérimentalement l’influence de cette couche d’air. Talioua et al (2022) [6] ont étudié l’effet d’une couche d’air emprisonnée entre une plaque impactant une surface libre au repos, en faisant varier la pression ambiante (1 *bar*, 0.75 *bar* et 0.5 *bar*) et la taille des plaques (de 3 à 14 *cm*) ainsi que la vitesse d’impact ( $V \leq 1.2$  *m/s*).

Dans les mers, les bulles sont connues pour être créées dans l’océan par différents mécanismes. Cependant, près des structures et du rivage, la plupart des bulles sont causées par des vagues déferlantes. Les bulles entraînées modifient l’impact. Dans son étude Wood (1941) [7] a trouvé que pour l’ajout de 1% d’air dans de l’eau faisait décroître la vitesse du son dans le liquide de 1500 *m/s* à 200 *m/s*. Ce qui implique la diminution de la pression d’impact compte tenu de la formule de Von Karman [1]. Des résultats similaires ont été démontrés expérimentalement par T. Mai (2019) [8, 9] en observant une diminution de la pression d’impact de 36 *bars* en eau pure à 6 *bars* en eau gazeuse pour une vitesse d’impact de 7 *m/s* et un taux d’aération de 1,6% pour une plaque plane impactant une surface libre.

## II – Méthodologie

### II – 1 Dispositif expérimental

Une expérience-modèle présentée à la FIGURE 1 a été développée au sein du Laboratoire Ondes et Milieux Complexes au Havre avec l'aide de Claude Houssin et Mathieu Beaujard techniciens du LOMC. Une pompe vient aspirer l'eau dans un réservoir de dimension  $120\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ , cette eau est injectée dans notre circuit hydraulique, un débitmètre vient mesurer la vitesse de notre écoulement. Le contrôle de ce débit se fait avec une vanne. L'écoulement vient ensuite s'aérer grâce à un système d'aération composé de 4 entrées d'airs. Un détendeur de pression nous permet de contrôler la pression d'entrée d'air entre  $0\text{ bar}$  et  $6\text{ bars}$ , la pression maximale du réseau d'air comprimé du laboratoire. Au bout de chacune des 4 entrées se trouve une aiguille de  $0.15\text{ mm}$  de diamètre intérieur. Ces aiguilles sont insérées dans notre écoulement avec un angle de  $45^\circ$ . Le jet vient impacter une plaque circulaire en acier de diamètre  $14\text{ cm}$ . Un capteur de pression piézoélectrique PE Kistler de type 601CAA de  $5.55\text{ mm}$  de diamètre est placé au centre de la plaque. Les mesures temporelles de pression sont faites à l'aide du logiciel fourni par Kistler et d'un amplificateur à courant continu avec une fréquence d'acquisition allant jusqu'à un maximum de  $208333\text{ Hz}$ . Une sonde optique A2 Photonic Sensors'M2 a été utilisée pour la mesure de la taille des bulles, la vitesse des bulles, ainsi que le taux d'aération. Le contrôle du taux d'aération est fait avec la variation de la pression d'entrée ainsi que la variation du nombre d'entrées.

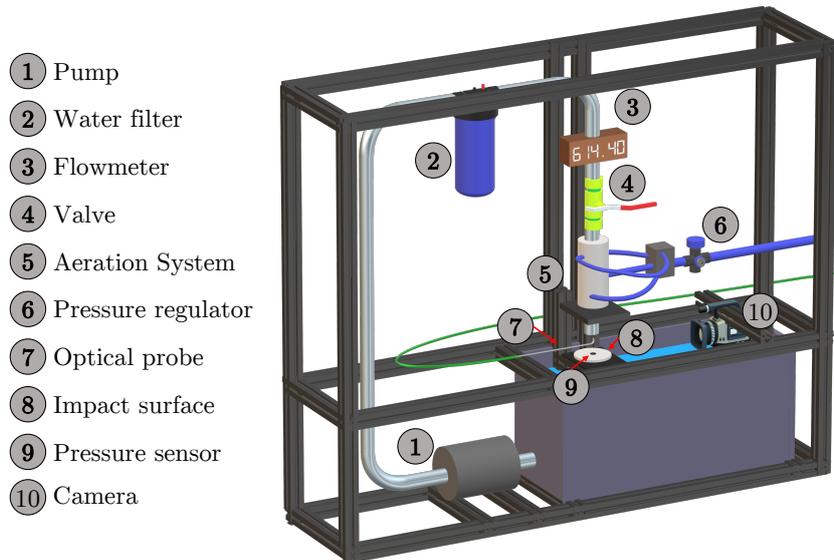


FIGURE 1 – Dispositif expérimental

Dans cette étude, trois vitesses d'impact de  $V_1 = 1.02\text{ m/s}$ ,  $V_2 = 1.59\text{ m/s}$  et  $V_3 = 2.17\text{ m/s}$  ont été explorées. De même, différents taux d'aération compris entre  $0\%$  et  $40\%$  ont été systématiquement étudiés pour chaque vitesse d'impact. Trois acquisitions de  $45\text{ s}$  de pression ont été enregistrées afin de réduire les incertitudes liées à l'expérience et seules les 25 dernières secondes sont prises en compte lors des post-traitements pour s'affranchir des effets thermiques sur le capteur de pression qui se produisent en début de mesure. Après toute modification de la vitesse et / ou du taux d'aération, le temps d'attente est d'environ dix minutes, de manière à garantir la stabilisation de l'écoulement. La plaque ainsi que le capteur de pression sont protégés pendant ce temps là et l'enregistrement commence toujours avant le retrait de cette protection.

## II – 2 Aération

Le système optique M2 de A2 Photonic Sensors est basé sur un laser de classe 1. Le faisceau laser d'une longueur d'onde de 1550 nm est invisible et est émis par le point de la sonde. Le fonctionnement du système est basé sur la mesure de la réflexion de ce faisceau laser au niveau de la pointe de la sonde. Plus précisément, le laser émis est partiellement réfléchi à l'extrémité de la sonde et revient vers le module optoélectronique. Tant que la pointe est entourée de liquide, le signal de sortie reste à un niveau faible ; lorsque la pointe est entourée de gaz, le signal monte à un niveau plus élevé. En définissant un seuil nous pouvons déterminer si la sonde se trouve dans du gaz ou dans de l'eau. Le temps pendant lesquels la pointe de détection de la sonde se trouve à l'intérieur d'une bulle d'air est  $T_g$ . Le taux d'aération  $\alpha$  est alors calculé comme la somme de toutes les durées de gaz divisées par la durée totale de l'expérience  $T_{total}$  :

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N T_{g_i}}{T_{total}} \quad (2)$$

Pour les mesures de vitesse et taille de bulles, la sonde utilise la présence d'interférences générées par le rapprochement des interfaces d'entrée et/ou de sortie d'une bulle avec un angle proche de la normale. En théorie, chaque créneau peut présenter un signal oscillatoire à l'entrée de la bulle et à sa sortie. Cependant, les oscillations de sortie sont présentes dans une grande majorité des cas, alors qu'il est assez rare de voir des oscillations d'entrée. La fréquence  $f$  des oscillations est directement proportionnelle à la vitesse  $U_{Bubble}$  de la bulle avec :

$$U_{Bubble} = f \frac{\lambda}{2n} \quad (3)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde du laser et  $n$  l'indice de réfraction du milieu de propagation ( $n_{eau} = 1.333$  pour le signal d'entrée,  $n_{air} = 1$  pour le signal de sortie). La taille  $S$  de la bulle peut être obtenue à partir de la vitesse obtenue ci-dessus et la durée du créneau correspondant à une bulle d'air :

$$S = U_{Bubble} \times T_g \quad (4)$$

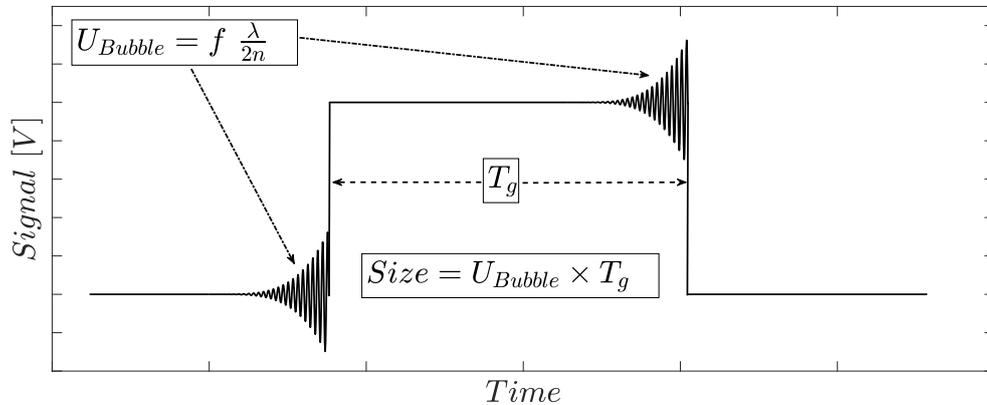


FIGURE 2 – Signal typique pour une bulle.

## II – 3 Pression et Ondelette

Différents principes de mesure sont utilisés dans la mesure de la pression. Cependant, deux principes se sont imposés dans la pratique : les capteurs de pression piézoélectriques et piézorésistifs. Dans notre cas, nous utilisons des capteurs de pression piézoélectriques. Le principe de ces capteurs de pression repose sur l'effet piézoélectrique que présente les matériaux piézoélectriques (tels que le quartz) qui produisent des charges électriques positives ou négatives lorsqu'une charge mécanique est appliquée à leurs surfaces extérieures. Cette charge est due au fait que les éléments positifs et négatifs du réseau cristallin sont déplacés les uns par rapport aux autres, formant ainsi un dipôle électrique. La charge générée est proportionnelle à la force ou à la pression exercée sur le cristal. Une chaîne de mesure piézoélectrique se compose essentiellement du capteur (PE) et d'un amplificateur de charge externe pour convertir le signal de charge en un signal de tension. Grâce à une calibration faite par le constructeur cette tension est convertie en pression.

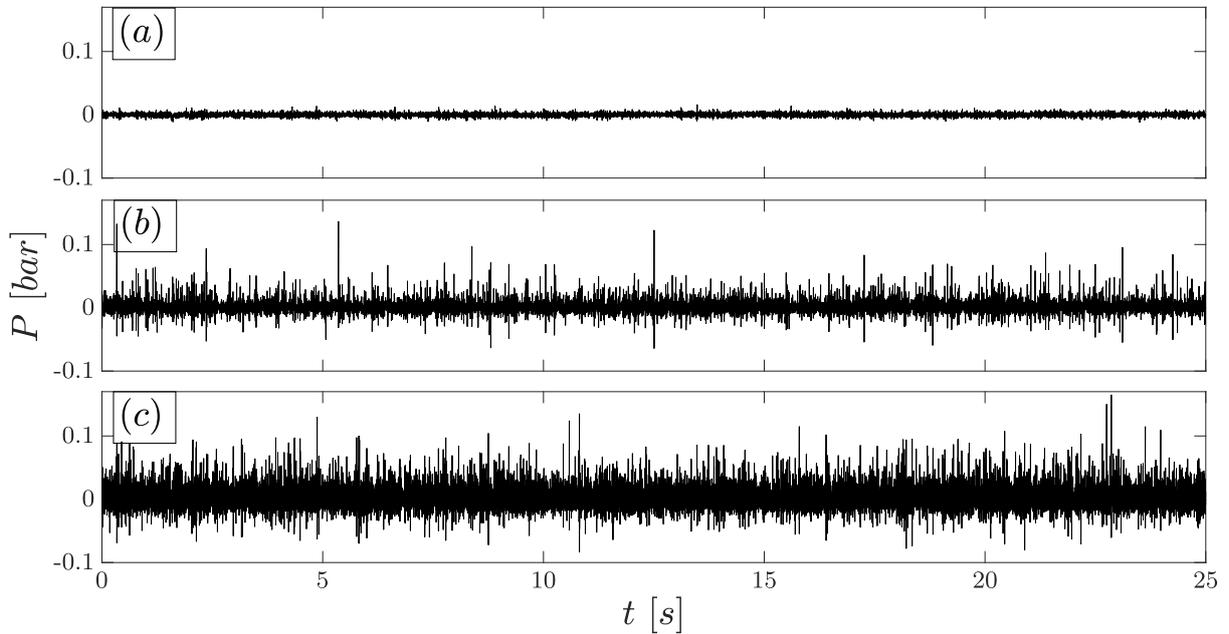


FIGURE 3 – Signaux temporels de pression pour différents taux d'aération (a) Taux d'aération 0% , (b) Taux d'aération 11%, (c) Taux d'aération 38%.

Une fois nos mesures de pression faites, nous remarquons que selon le taux d'aération le nombre de pics présent dans notre signal augmente (cf. FIGURE 3). Chaque alternance bulle/eau ou eau/bulle qui vient impacter le capteur génère un pic de pression suivi d'oscillation due à la compression/détente d'une bulle d'air. La perspective est d'isoler chaque évènement et de faire une étude statistique des valeurs des pics de pression, la fréquence des oscillations ainsi que l'impulsion en fonction des différents paramètres.

La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier à fenêtre glissante avec des fonctions différentes. Là où Fourier décompose le signal en sinus et cosinus, la transformée en ondelette utilise d'autres fonctions (Haar, Daubechiers, Morse, ...). Cette transformée nous donne un accès à la position des fréquences en fonction du temps, ce qui nous permet avec un seuil donné de localiser les évènements et d'identifier le début  $t_i$  et la fin  $t_f$  de chaque évènement (cf. FIGURE 4).

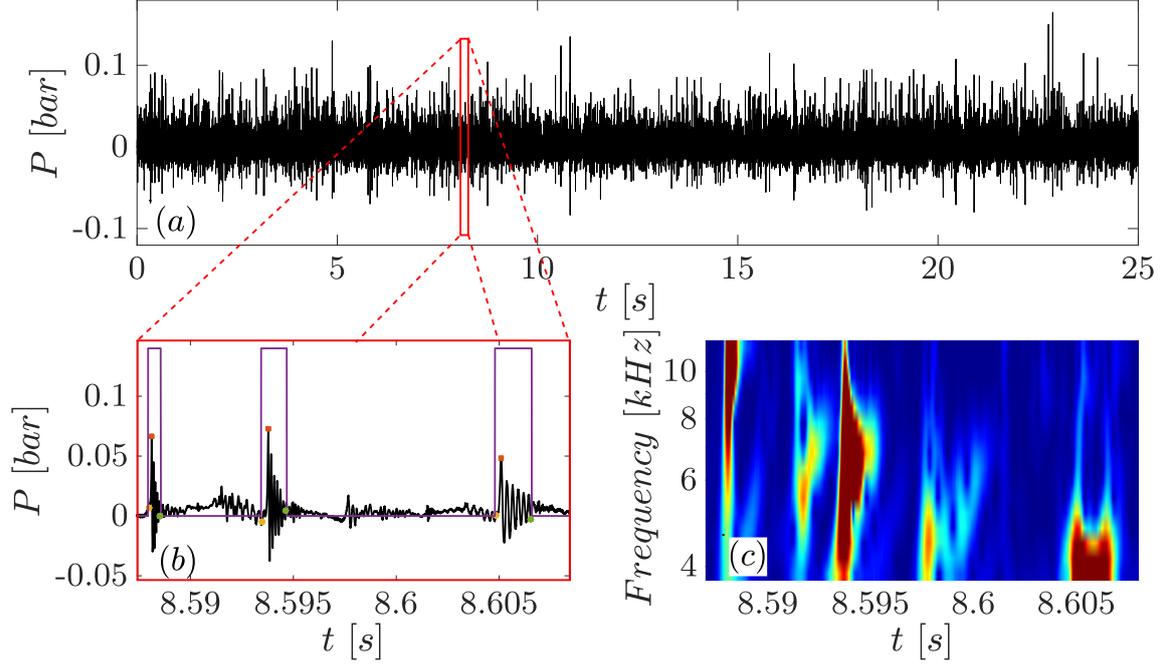


FIGURE 4 – Schéma de détection des pics (a) Signal temporel de pression, (b) Zoom sur des pics de pression, (c) Transformée en ondelettes correspondant au zoom.

### III – Résultats

#### III – 1 Aération

Afin d'étudier l'influence du taux d'aération ainsi que de la taille des bulles, une variation du taux d'aération ainsi que de la taille des bulles est effectuée pour chaque vitesse. La variation du taux d'aération est obtenue en faisant varier le nombre d'entrée d'air (de 1 à 4). Une augmentation du nombre d'entrée d'air permet d'augmenter le taux d'aération sans augmenter la taille des bulles. D'un autre côté, une variation de la pression d'entrée (cf. TABLE 1) nous permet d'augmenter le taux d'aération ainsi que la taille des bulles (cf. FIGURE 7).

Vitesse	$P_1$ [bar]	$P_2$ [bar]	$P_3$ [bar]
$V_1 = 1.02 \text{ m/s}$	0.5	1	1.5
$V_2 = 1.59 \text{ m/s}$	1	1.5	2
$V_3 = 2.17 \text{ m/s}$	2	3	4

TABLE 1 – Pression d'entrée d'air.

Les mesures de vitesse de bulle ainsi que leur taille sont obtenues pour un nombre de bulles proche de 1400 pour chaque cas. Du fait que les bulles ne sont pas toutes de la même taille et vitesse, les résultats obtenus sont représentés sous forme de distribution (cf. FIGURE 5) de taille et de vitesse de bulle. Pour la suite de l'étude, les tailles et vitesses présentées pour chaque cas sont les moyennes de ces distributions.

Un des principaux problèmes que nous devons résoudre était la dissociation des différents paramètres, à savoir la vitesse, le taux d'aération, ainsi que la taille des bulles.

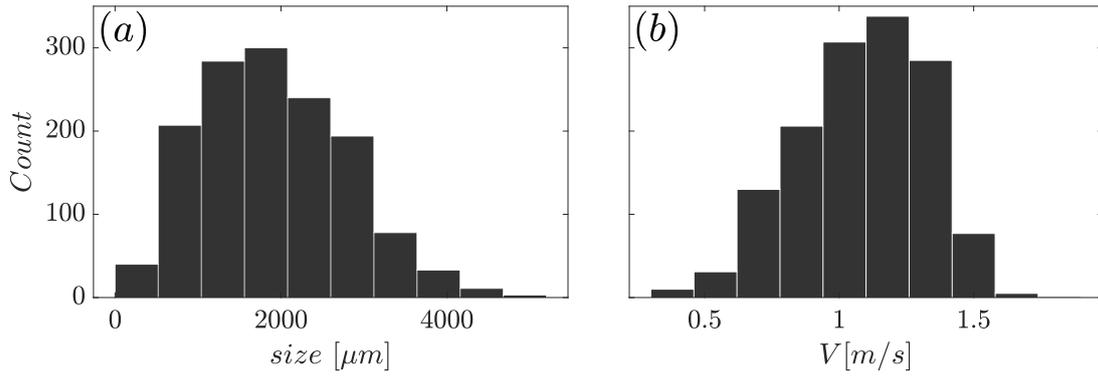


FIGURE 5 – Exemple de distribution de (a) Taille et de (b) Vitesse de bulle.

Dans un premier temps, l'augmentation du taux d'aération avec l'augmentation de la pression d'entrée induisait une augmentation de la vitesse. Ce problème a été résolu avec la variation du nombre d'injecteurs pour l'entrée d'air. Pour les trois vitesses étudiées les vitesses de bulles restent presque constantes (avec une légère augmentation) pour les différents taux d'aération (cf. FIGURE 6 (a)). De même la dissociation de la vitesse et de la taille de bulles a été obtenue (cf. FIGURE 6 (b)) avec une augmentation de taille de bulle liée à l'augmentation de la pression d'entrée, avec des vitesses presque constantes. La légère augmentation de la vitesse observée est due à l'augmentation de la pression à l'entrée d'air.

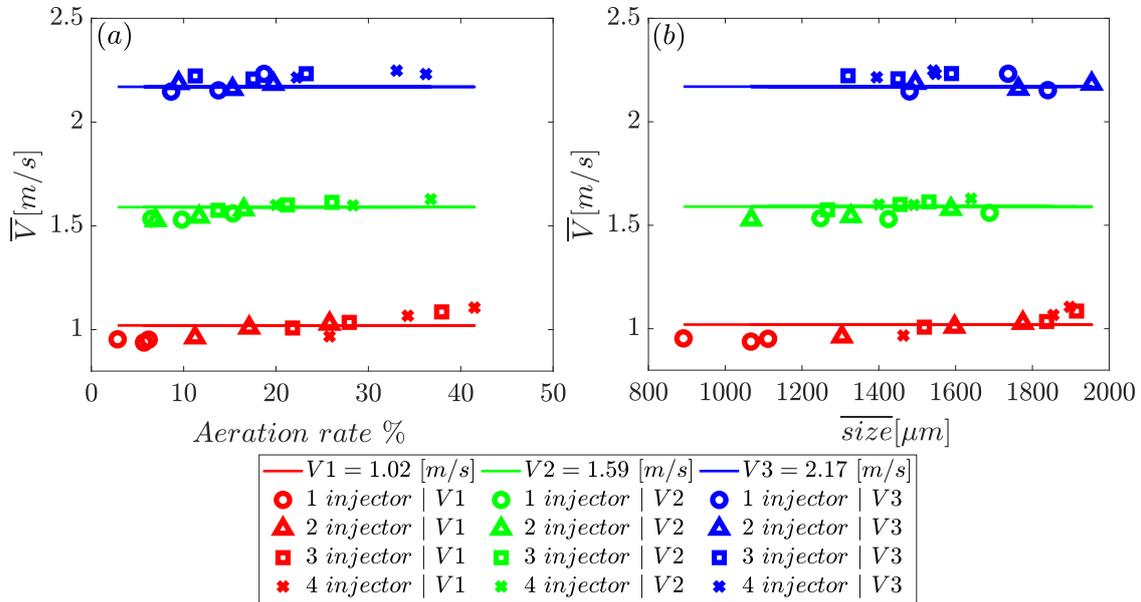


FIGURE 6 – Évolution de la vitesse moyenne des bulles en fonction du (a) Taux d'aération et de la (b) Taille moyenne des bulles.

Un des problèmes non résolu pour l'instant reste la dissociation des tailles de bulles et du taux d'aération (cf. FIGURE 7), le taux d'aération restant lié à la taille de bulle. Une augmentation de la taille de bulles est observée avec l'augmentation de la pression. Si par exemple nous regardons pour une vitesse donnée et pour un nombre d'injecteur donné, l'augmentation du taux d'aération est lié à la pression d'entrée. Nous pouvons voir que la taille de bulles augmente avec cette augmentation de pression.

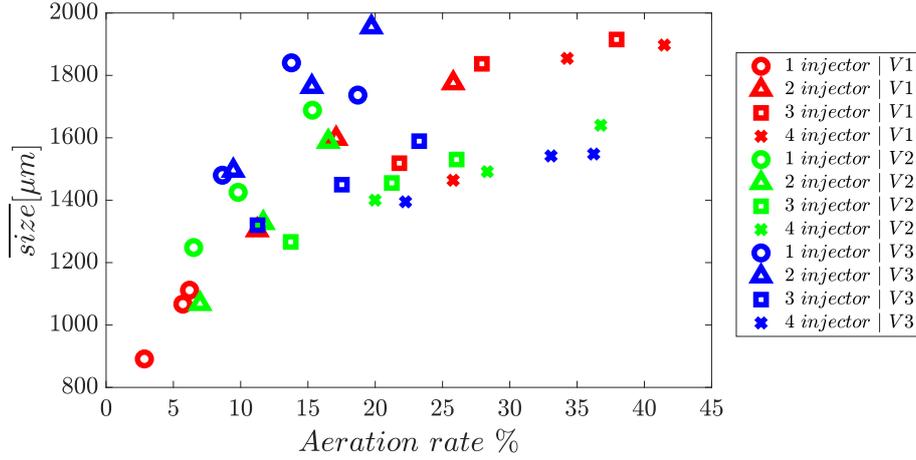


FIGURE 7 – Évolution de la taille moyenne des bulles en fonction du taux aération.

### III – 2 Pression, Impulsion et fréquence des oscillations

Une fois les événements détectés, les grandeurs suivantes sont identifiées. Les pics de pression correspondent au premier pic le plus intense. Chaque pic est suivi par des oscillations décroissantes avec une fréquence propre à chaque événement. L'impulsion  $I_{total}$  qui est définie comme l'intégrale de la valeur absolue du signal moins le moyenne du signal pour chaque événement, s'écrit :

$$I_{total} = \int_{t_i}^{t_f} |P_{i,f} - \bar{P}_{i,f}| dt \quad (5)$$

Une fois ces valeurs trouvés, de même que pour les tailles des bulles, nous obtenons une distribution pour les pressions maximales, les fréquences, et les impulsions. Les résultats présents dans cette partie représentent des moyennes,  $\bar{P}$  pour les pressions,  $\bar{f}$  pour les fréquences, et  $\bar{I}_{total}$  pour l'impulsion.

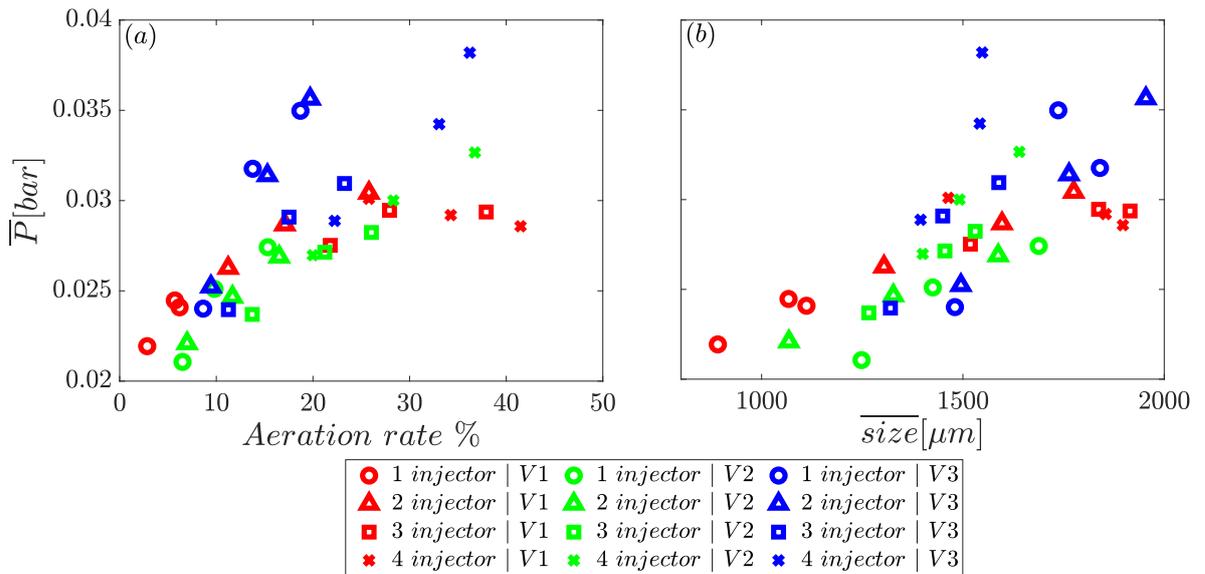


FIGURE 8 – Pression maximale moyenne en fonction du (a) Taux d'aération et de la (b) Taille moyenne des bulles

La FIGURE 8 montre la pression maximale moyenne en fonction du taux d'aération et de la taille de bulle pour différentes vitesses d'impact. Bien que la pression maximale augmente avec le taux d'aération pour le début, la relation n'est plus vérifiée pour des taux  $> 20\%$  (cf. FIGURE 8 (a)). D'un autre côté la dépendance avec la taille des bulles semble plus linéaire. Le pic de pression n'augmente pas nécessairement avec la vitesse comme on pourrait s'y attendre. Par conséquent, sur la base des résultats présentés, aucune conclusion claire ne peut encore être tirée sur le comportement de pression en fonction du taux d'aération et de la taille des bulles. Cependant, la présence d'air modifie les valeurs de pression.

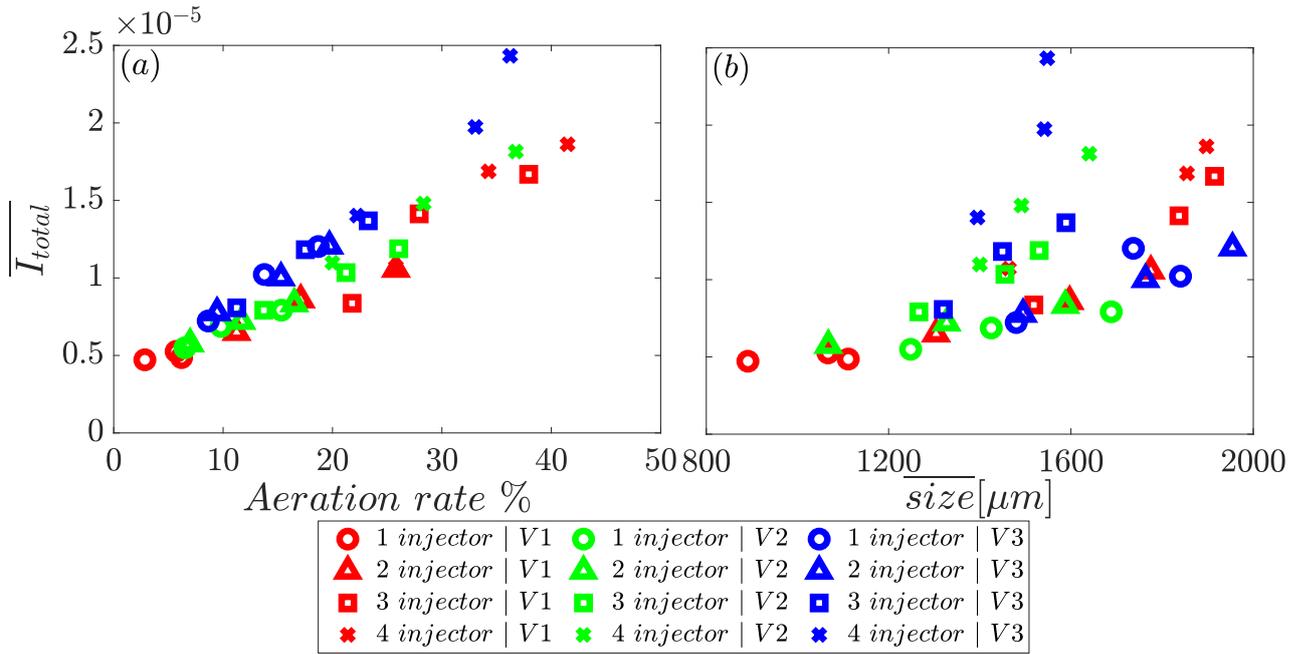


FIGURE 9 – Impulsion moyenne en fonction du (a) Taux d'aération et de la (b) Taille moyenne des bulles

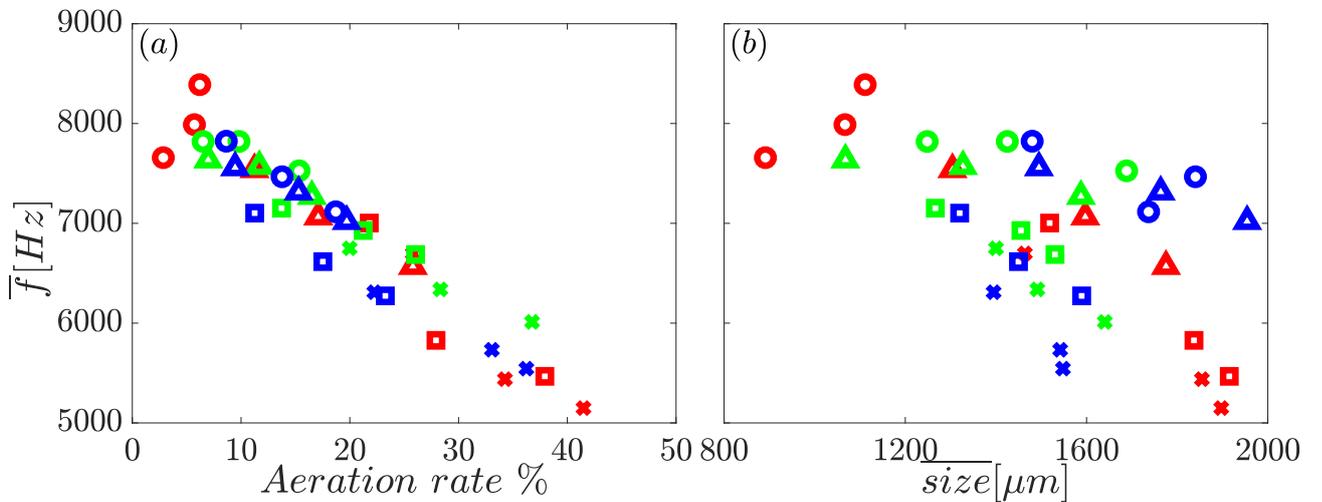


FIGURE 10 – Fréquence moyenne des oscillations en fonction du (a) Taux d'aération et de la (b) Taille moyenne des bulles

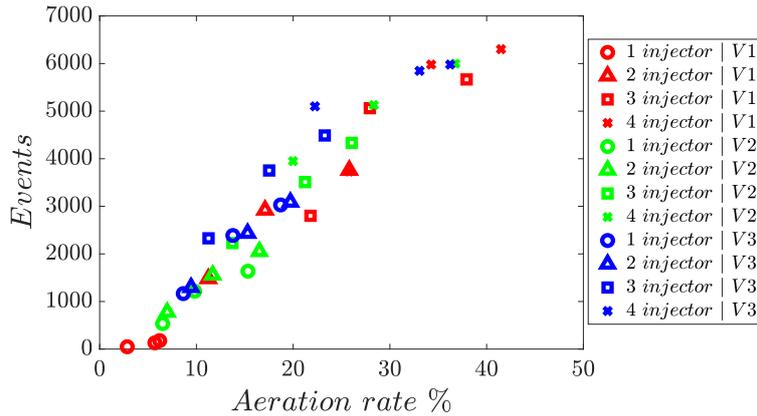


FIGURE 11 – Nombre d'événements en fonction du Taux d'aération

Les résultats de pression n'étant pas satisfaisant, nous nous intéressons à l'impulsion pour mettre en évidence la charge à laquelle est soumise la plaque. Les résultats obtenus sont représentés sur la FIGURE 9 où nous pouvons voir que l'impulsion augmente linéairement avec le taux d'aération. Cela montre que la plaque est soumise à plus d'effort avec l'augmentation du taux d'aération. Nous n'avons pas de tendance nette en fonction de la taille des bulles.

Chaque événement est caractérisé par un premier pic suivi d'oscillations. La FIGURE 10 représente la fréquence moyenne des oscillations en fonction du taux d'aération. Nous pouvons remarquer une décroissance de la fréquence en fonction du taux d'aération. Cette décroissance peut être expliquée dans un premier temps par la présence d'un nombre plus important de bulles qui engendrerait un amortissement des oscillations. D'un autre côté, plus le taux d'aération augmente, plus les bulles d'air sont grandes, Or la fréquence d'oscillation d'une bulle d'air est inversement proportionnelle à sa taille.

## IV – Conclusions et perspectives

Pour conclure, cette première phase de l'étude a permis de développer une expérience-modèle qui nous permet d'étudier le phénomène d'impact d'un jet aéré sur une plaque. Dans un premier temps nous avons réussi à dissocier la vitesse du taux d'aération ainsi que la taille de bulle. Les résultats ont montré que la pression des impacts successifs sur la plaque est modifiée par la présence de l'air. Ces efforts subis sont mieux représentés par l'impulsion qui montre une évolution linéaire en fonction du taux d'aération. D'un autre côté, la fréquence est un des paramètres clés pour comprendre les impacts et les prédire en fonction du taux d'aération et de la taille des bulles. Néanmoins, il n'a pas été trouvé de dépendance claire avec les vitesses d'impacts. Une nouvelle pompe permettant d'aller jusqu'à des vitesses de 10  $m/s$  est en cours d'installation pour pouvoir avoir plus de variation de vitesse et voir son influence sur les impacts. Un autre paramètre qui va améliorer la qualité des résultats est l'augmentation du temps d'acquisition pour les taux d'aération les plus faibles car comme nous pouvons le voir sur la FIGURE 11, le nombre d'événements détectés reste très faible ( $\approx 50$ ) pour les taux d'aérations faibles ce qui rend l'étude statistique moins fiable pour ces configurations. Cette première étude nous a permis d'avoir un premier regard sur le phénomène des impacts de jet et d'identifier les différents paramètres impliqués, ceci nous permettra de mieux organiser notre prochaine campagne expérimentale.

## V – Remerciements

Les auteurs reconnaissent le soutien financier de l’Agence Nationale de la Recherche et du LabEx EMC3 à travers le projet PERCUSS (Grant No. ANR-10-LABX-09-01). Tous les auteurs reconnaissent le soutien technique de Mathieu Beaujard et Claude Houssin pour leur aide précieuse lors de la conception du dispositif expérimental.

## Références

- [1] T. Von Kármán. *The Impact on Seaplane Floats During Landing*. Technical note. National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.
- [2] Herbrt Wagner. Über stoß- und gleitvorgänge an der oberfläche von flüssigkeiten. *ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 12(4) :193–215, 1932.
- [3] A de Rouville, P Besson, and P Petry. Etat actuel des etudes internationales sur les efforts dus aux lames. *Google-Books-ID : \_SDCoAEACAAJ*, 1938.
- [4] R A Bagnold. Interim report on wave-pressure research. (includes plates and photographs). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 12(7) :202–226, 1939.
- [5] J. H. G. Verhagen. The Impact of a Flat Plate on a Water Surface. *Journal of Ship Research*, 11(04) :211–223, 12 1967.
- [6] Abdessamad Talioua, Belaïd Berkane, Marc Batlle Martin, Gaële Perret, and Grégory Pinon. Flat plate pressure impact on a still water surface : The effect of surrounding ambient pressure and plate size. *Ocean Engineering*, 263 :111926, 2022.
- [7] Albert Beaumont Wood and RB Lindsay. A textbook of sound. *Physics Today*, 9(11) :37, 1956.
- [8] Tri Mai, Chi L. Mai, Alison Raby, and David Greaves. Aeration effects on water-structure impacts : Part 1. drop plate impacts. *Ocean Engineering*, 193 :106600, 2019.
- [9] Tri Mai, Cong Mai, Alison Raby, and Deborah Greaves. Aeration effects on water-structure impacts : Part 2. wave impacts on a truncated vertical wall. *Ocean Engineering*, 186 :106053, 08 2019.