



SUIVI D'INTERFACES ISSUES DE L'INSTABILITE DE RICHTMYER-MESHKOV A PARTIR DE VISUALISATIONS PAR COUPE PLANE LASER

Christian Mariani*, Laurent Biamino, Georges Jourdan & Lazhar Houas

Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13013 Marseille, France

*Correspondant: christian.mariani@univ-amu.fr

Résumé : Le suivi d'une interface gazeuse présentant initialement des perturbations sinusoïdales accélérée par une onde de choc est réalisé au moyen d'un dispositif de visualisation par coupe plane laser dans le cadre de l'étude de l'instabilité de Richtmyer-Meshkov. Cette méthode a permis d'extraire les contours de l'interface pour en réaliser une décomposition en série de Fourier. Cette analyse aboutit à la quantification de la croissance des perturbations en amplitude ainsi que de leur déformation au cours du temps.

1 Problématique

L'instabilité de Richtmyer-Meshkov est une instabilité d'interface qui intéresse différents domaines de la recherche. En astrophysique, cette instabilité est étudiée pour comprendre le devenir des naines. En aéronautique, elle est étudiée afin d'optimiser les mélanges de carburant et de comburant dans les statoréacteurs à combustion supersonique. Dans le domaine du nucléaire, cette instabilité est étudiée car elle est l'un des verrous qui empêche aujourd'hui d'obtenir les conditions thermodynamiques nécessaires à la réalisation de la fusion par confinement inertiel. C'est dans ce cadre et en collaboration avec le CEA-DAM/DIF que ce travail s'inscrit.

Le processus de l'instabilité est le suivant : quand une interface séparant deux fluides de densités différentes est accélérée de façon impulsionnelle par une onde de choc, la présence de défauts de surface, si petits soient-ils, induit une production de vorticités au passage du choc du fait de la non colinéarité des gradients de densité et de pression. Cette production de vorticités entraîne une croissance des perturbations et donc une interpénétration des deux fluides en présence.

Dans le cas de macro-perturbations sinusoïdales, le phénomène est bien connu dans les premiers temps de développement où seule l'amplitude grandit. Lors d'une seconde phase, les perturbations vont se déformer puis vont se déstabiliser pour aboutir au mélange des fluides en présence.

2 Dispositif expérimental

Le tube à choc T200 du laboratoire IUSTI est un dispositif permettant de générer des ondes de choc de manière contrôlée. Il s'agit d'un tube en acier horizontal dont la veine centrale est de section carrée (20cm x 20cm). Il est composé de trois sections : une section haute pression, une section basse pression et une veine d'essais. Un diaphragme placé entre les

sections haute pression et basse pression va permettre de générer l'onde de choc lors de sa rupture sous l'effet de la différence de pression que l'on établit de part et d'autre. La veine d'essais est une section fenêtrée permettant une visualisation de l'écoulement, dispose également de plusieurs stations de mesure de pression et est longue de 1,5m.

Un système de visualisation par coupe plane laser est couplé à ce tube à choc. Celui-ci est composé d'un laser à vapeur de cuivre qui émet sur deux longueurs d'onde 510,6 nm (vert) et 578,2 nm (jaune), de puissance nominale 20 W et dont la fréquence de pulsation peut atteindre 50 kHz. Le faisceau de laser est transformé en une nappe au moyen d'un système de lentilles (voir figure 1). Une caméra numérique ultrarapide permet de réaliser des films dont la fréquence d'acquisition peut atteindre 65000 images par seconde. En ce qui concerne les expériences présentées dans ce papier, la fréquence d'acquisition de la caméra comme celle de pulsation du laser sont synchronisées et fixées à 10 kHz.

L'installation est également dotée de 4 capteurs de pression dynamique dont les signaux sont enregistrés sur des oscilloscopes. Ils vont à la fois permettre de mesurer les vitesses des ondes de chocs et permettre de déclencher l'acquisition des données.

3 Conditions initiales

L'originalité de cette étude réside dans le moyen utilisé pour définir la forme initiale de l'interface entre les deux gaz [1]. Cette interface avec des macro-perturbations sinusoïdales, qui doit séparer les gaz d'étude (air et SF₆) jusqu'au passage du choc sans que ceux-ci ne commencent à se mélanger, est matérialisée par une grille sur laquelle est déposé un très fin film de nitrocellulose dont l'épaisseur est inférieure au micromètre. Afin de définir la forme avec un maximum de précision la grille est dessinée sur ordinateur et conçue par stéréo-lithographie.

Cette grille présente des perturbations sinusoïdales monomodes 2D sur 16 des 20 cm de hauteur de veine. La longueur d'onde λ de ces perturbations est de 8 cm et deux amplitudes a_0 sont testées de 0.3 cm et 0.9 cm. La combinaison amplitude-longueur d'onde est déterminante dans l'évolution de l'instabilité. En cas de fortes perturbations (a_0 proche de λ), la phase non linéaire de l'instabilité est atteinte beaucoup plus rapidement.

Le choix des deux gaz utilisés est également déterminant dans l'évolution de l'instabilité qui dépend du gradient de densité à l'interface au passage de l'onde de choc à son niveau. Les gaz utilisés sont de l'air et de l'hexafluorure de soufre (SF_6) de densités respectives 1,184 kg/m³ et 6,25 kg/m³.

L'air estensemencé par de fines particules de fumée d'encens réparties de façon homogène mais en quantité suffisamment faible pour ne pas influencer sur la densité de l'air. Ces particules sont nécessaires à la distinction de l'interface par diffusion de la nappe laser.

L'instabilité est initiée par une onde de choc incidente dont le nombre de Mach vaut 1,45. Ce choc est suffisamment intense pour pulvériser la membrane en nitrocellulose.

4 Résultats

La figure 2 présente des clichés pris lors d'une expérience avec les perturbations de forte amplitude ($\lambda=8$ cm et $a_0=0,9$ cm).

Juste avant le passage de l'onde de choc incidente ($t=0$), l'interface est bien sinusoïdale. Après le passage du choc, les perturbations vont croître en amplitude mais également se déformer. Les "sinusoïdes" remplies d'air qui grandissent vers le SF_6 vont s'arrondir et prendre une forme de bulle tandis que celles contenant du SF_6 qui grandissent vers la partie remplies d'airensemencé vont prendre une forme de pointe.

Afin de quantifier ce phénomène et dans le but de valider des modèles numériques développés au CEA, l'amplitude des perturbations a été mesurée directement sur chaque image en mesurant la position des extrema de l'interface (sommets des pointes et des bulles); l'amplitude correspond à la demi-distance entre ces extrema. Une décomposition en série de Fourier a également été réalisée sur les contours de l'interface. Cette analyse nécessite un traitement d'image préalable afin d'extraire les points composants le contour. Les étapes de l'extraction des

contours discrétisés de l'interface sont détaillées dans la figure 3.

A partir des images brutes, on cherche les zones de plus fort gradient de couleur, puis on "binarise" l'image. A partir de l'image binaire, on extrait le contour. Ce contour discret est corrigé lorsque celui n'est plus une fonction (plusieurs points pour une même abscisse).

La décomposition en série de Fourier consiste à calculer les coefficients a_n et b_n définis par les formules suivantes :

$$a_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(y_i) \cos\left(2fn \frac{i-1}{N}\right)$$

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(y_i) \sin\left(2fn \frac{i-1}{N}\right)$$

avec n l'indice du coefficient de Fourier, N le nombre de points de l'interface discrétisé, $X(y_i)$ la position de l'interface pour une valeur y_i de hauteur dans la veine d'essais.

Les figures 4 (a) et (b) présentent l'ensemble des mesures réalisées pour chacune des deux interfaces testées (respectivement $a_0=0,3$ cm et 0,9 cm).

Nous pouvons constater que l'évolution de l'amplitude mesurée est rapidement non linéaire comme ce qui apparaît sur les clichés présentés en figure 2 avec une perte rapide de symétrie. On peut également voir que cette mesure est en bon accord avec les modèles d'évolutions existants [3][4][5].

Si on analyse l'évolution des coefficients issus de la décomposition en série de Fourier, seuls les coefficients a_n pour des n petits ont une valeur non négligeable. Aussi seuls a_1 , a_2 et a_3 sont représentés. L'évolution de a_1 coïncide avec celle de l'amplitude tant que les perturbations ne se déforment pas. Dès que les perturbations perdent leur forme sinusoïdale cela se traduit au niveau de la décomposition en série de Fourier à la croissance des modes supérieurs. Ainsi, la croissance rapide des coefficients a_2 et a_3 traduit une déformation rapide des perturbations. La comparaison de cette décomposition avec des simulations numériques réalisées au CEA a également donné un bon accord et a permis de mettre en évidence l'importance des conditions initiales dans ce type d'études [2].

5 Conclusion

Une technique de visualisation par coupe plane laser a été utilisée afin de suivre une interface gazeuse au niveau de laquelle se développe l'instabilité de

Richtmyer-Meshkov suite à l'accélération de l'interface par une onde de choc. L'utilisation de cette technique est particulièrement bien adaptée à ce type d'étude et a permis d'extraire avec précision, moyennant un traitement d'image relativement simple, les contours de l'interface. L'évolution des perturbations sinusoïdales initialement imposées au niveau de l'interface a ainsi pu être observée et quantifiée au moyen d'une décomposition en série de Fourier de l'interface discrétisée. Cette étude a permis de valider des simulations numériques du CEA.



Fig. 1: Photographie du montage optique transformant le plan en nappe laser et de la chambre d'expérience avec une membrane stéréo-lithographiée.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le CEA-DAM/DIF sous le contrat No. 09-49-C-SACO. Les auteurs remercient tout particulièrement M. Vandenboomgaerde et D. Souffland.

Références

- [1] C. Mariani, M. Vandenboomgaerde, G. Jourdan, D. Souffland & L. Houas, "Investigation of the Richtmyer-Meshkov instability with stereolithographed interfaces", *Physical Review Letters*, **100**, 254503 (2008).
- [2] M. Vandenboomgaerde, D. Souffland C. Mariani, L. Biamino G. Jourdan, & L. Houas, "An experimental and numerical investigation of the dependency on the initial conditions of the Richtmyer-Meshkov instability", *Physics of Fluids*, **25(2)**, 024109 (2014).
- [3] O. Sadot, L. Erez, U. Alon, D. Oron, L. Levin, G. Erez, G. Ben-Dor and D. Shvarts, "Study of nonlinear evolution of single-mode and two-bubble interaction under Richtmyer-Meshkov Instability" *Physical Review Letters*, **80**, 1654 (1998).
- [3] G. Dimonte, and P. Ramaprabhu, "Simulations and model of the nonlinear Richtmyer-Meshkov instability", *Physics of Fluids*, **22(1)**, 014104 (2010).
- [4] K. Mikaelian, "Analytic Approach to Nonlinear Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov Instabilities", *Physical Review Letters*, **80**, 508 (1998).

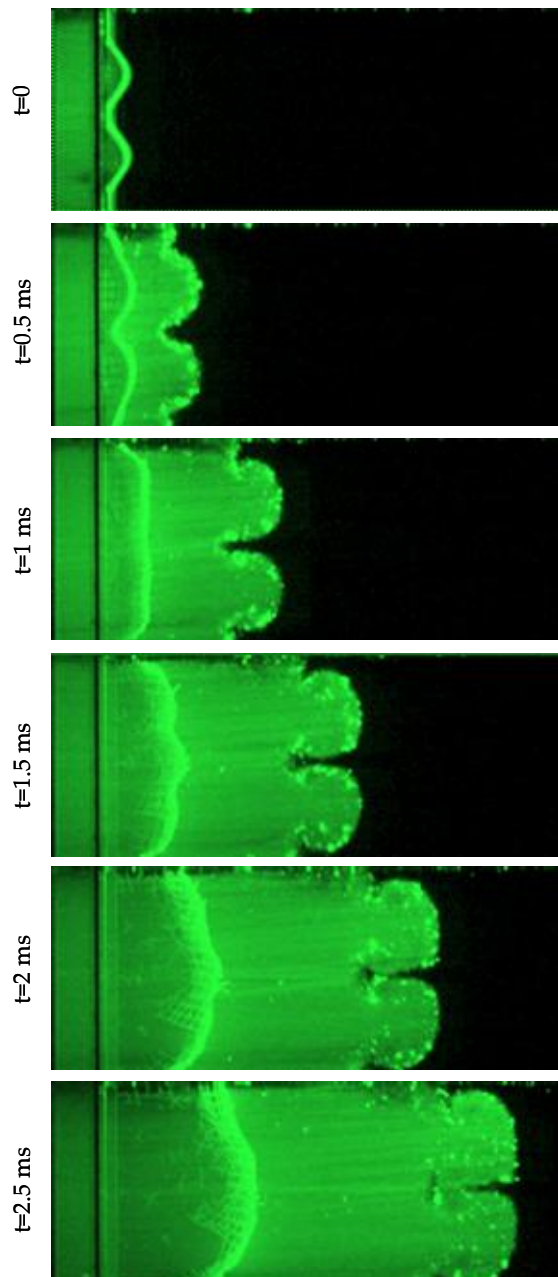


Fig. 2: Séquence de clichés obtenus par coupe plane laser d'une interface air/SF₆ initialement sinusoïdale ($\lambda=8$ cm et $\alpha=0,9$ cm) suite au passage d'une onde de choc de nombre de Mach $M=1.45$.

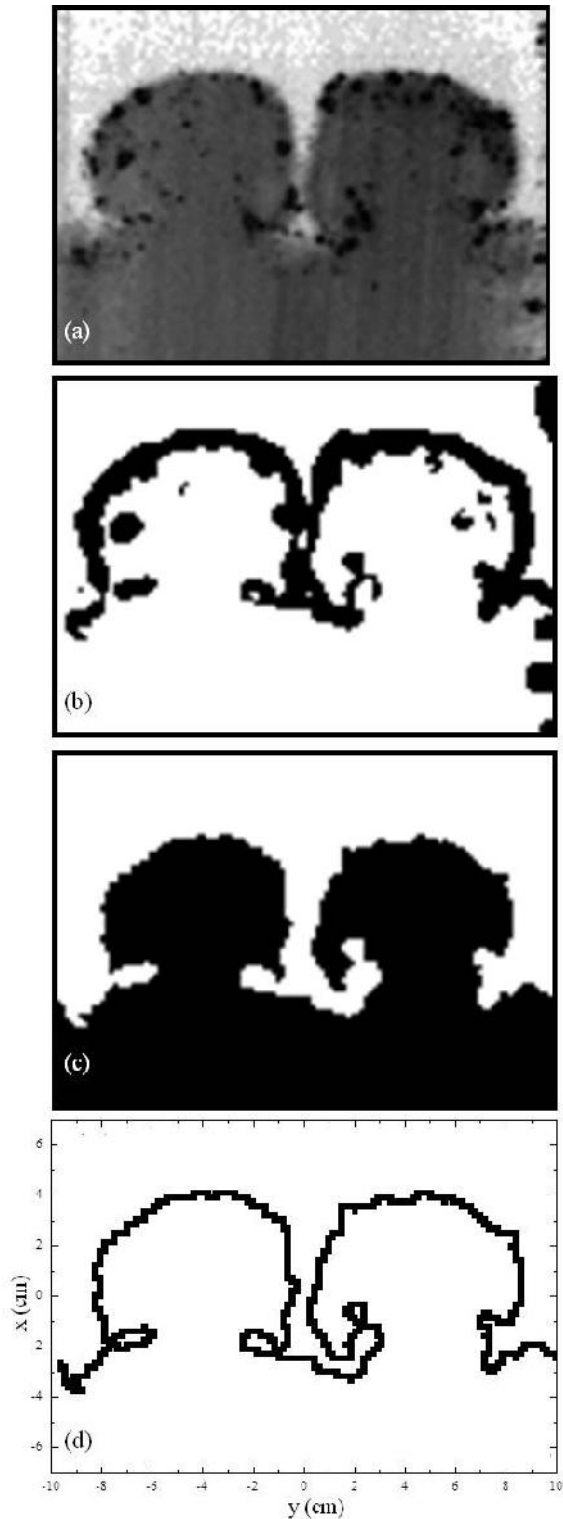


Fig.3: Images de l'interface au cours du traitement d'images nécessaire à la décomposition en série de Fourier: (a) image brute, (b) image avec un filtre de gradient de couleur, (c) image binaire, (d) contour discret.

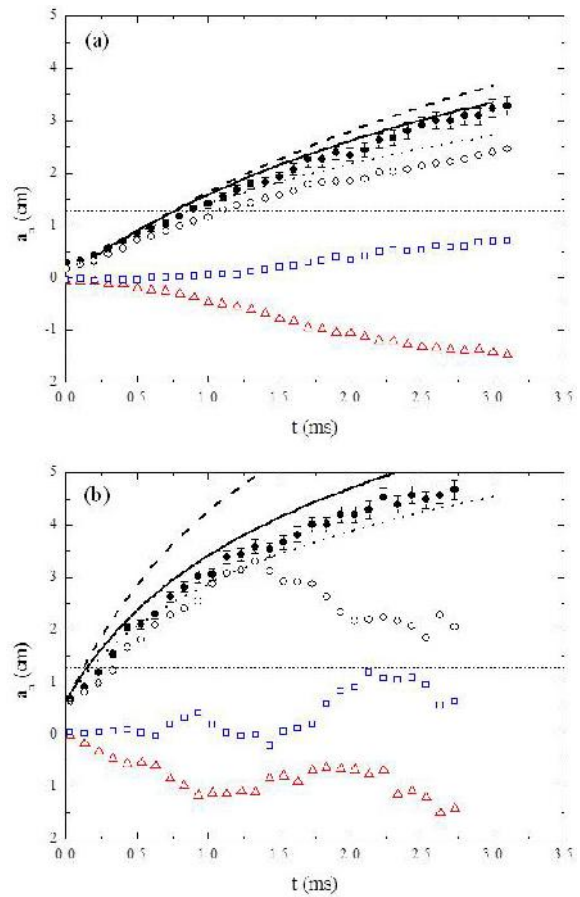


Fig.4: Evolutions en fonction du temps de l'amplitude des perturbations (●) et des trois premiers coefficients de Fourier a_1 (○), a_2 (□) et a_3 (△) et comparaison à des modèles existants : modèle de Sadot et al.[3] (---), modèle de Dimonte et al.[4] (—) et modèle de Mikaelian (.....) [3] (a) cas de perturbations sinusoïdales de faible amplitude ($\lambda=8$ cm et $a_0=0,3$ cm) (b) cas de perturbations sinusoïdales de forte amplitude ($\lambda=8$ cm et $a_0=0,9$ cm)