

Etude comparative de deux modes de génération de mascaret par vélocimétrie par imagerie de particules résolues en temps et stéréo-réfraction

Laurent David¹, Guillaume Gomit¹, Alessia Simonini², Germain Rousseaux¹, Ludovic Chatellier¹, Damien Callaud¹

1: Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, France

2: Institut VKI, Belgique

* correspondant: Laurent.David@univ-poitiers.fr

Un mascaret est un ressaut de marée dans lequel le front de la marée montante forme une onde ou un train d'ondes qui se déplace dans une rivière ou une baie étroite en remontant le courant. Sous l'influence de différents paramètres, le mascaret peut avoir des formes de surface libre assez différentes comme par exemple un ressaut mobile ondulé ou déferlant. Dans le cadre de cette étude expérimentale, l'objectif est de tester et de comprendre quel est le mode de génération en laboratoire de ce type d'écoulement le plus représentatif de la réalité à partir de techniques optiques de mesure. Pour cela, deux modes de génération sont employés. La première façon est obtenue par une baisse du débit d'écoulement dans le canal qui permet un remplissage du bassin aval suivi d'une surélévation du niveau d'eau entraînant la propagation d'une onde de retour. La seconde façon est la fermeture brutale d'une porte à l'aval du canal générant une onde qui remonte le courant. La forme de la surface libre, les champs instantanés de vitesse sont comparés pour les deux modes de génération afin de comprendre les transferts d'énergie dans la colonne d'eau au passage de l'onde et de définir la génération qui produit un mascaret se rapprochant le plus possible du phénomène physique observé à pleine échelle.

1 Introduction

Un mascaret est un phénomène naturel de marée dans lequel le front de la marée montante forme une onde ou un train d'ondes qui se déplace dans une rivière ou une baie étroite en remontant le courant. Sous l'influence de différents paramètres, le mascaret peut avoir des formes de surface libre assez différentes comme par exemple un ressaut mobile ondulé ou déferlant. Différentes études de terrain [5] ont montré les fortes vitesses engendrées par ce phénomène et sa forte capacité à remettre en suspension les sédiments. Néanmoins chaque mesure comporte une variabilité des paramètres qui limitent finalement la compréhension fine des mécanismes physiques mis en jeu. Pour remédier à cela, il est donc préférable de reproduire ce phénomène en laboratoire dans des conditions expérimentales contrôlées. Dans cette étude l'objectif est de tester et de comprendre quel est le mode de génération en laboratoire de ce type d'écoulement le plus représentatif de la réalité à partir de techniques optiques de mesure. Pour cela, deux modes de génération sont employés. La première façon est obtenue par une baisse du débit d'écoulement dans le canal qui permet un remplissage du bassin aval suivi d'une surélévation du niveau d'eau entraînant la propagation d'une onde de retour [7]. La seconde façon est générée par la fermeture brutale d'une porte à l'aval du canal générant une onde qui remonte le courant [1]. La première méthode sera particulièrement développée dans ce papier et les résultats entre les deux méthodes seront comparés pour un même nombre de Froude. Pour cela, la forme de la surface libre, les champs instantanés de vitesse, les fluctuations turbulentes et les composantes du tenseur de Reynolds sont comparés pour les deux modes de génération afin de comprendre les transferts d'énergie dans la colonne d'eau au passage de l'onde et de définir la génération qui produit un mascaret se rapprochant le plus possible du phénomène physique observé à pleine échelle.

2 Expérience et traitement des données

2.1 Montage expérimental

Les deux expériences sont menées dans un canal horizontal à surface libre de 8 m de long et de section rectangulaire (largeur $B=0,39$ m). Le circuit fonctionne en circuit fermé à l'aide d'une pompe à rotor excentré pour un débit de 4 L/s. L'eau est introduite dans le canal à travers un convergent 3D via des crépines, deux grilles d'homogénéisation et un nid d'abeilles qui favorisent l'orientation de l'écoulement (Figure 1). Les expériences sont réalisées pour un nombre de Froude de 1.36 basé sur la somme de la vitesse débitante V_0 de l'écoulement et la célérité de l'onde de retour U et la hauteur d'eau initiale en amont du front d'ondes (h_0 variant de 35 à 38 mm) :

$$Fr = \frac{V_0 + U}{\sqrt{g \times h_0}} \quad (1)$$

2.2 Génération des ressauts mobiles

Différents modes de génération du ressaut mobile existent dans la littérature sous la forme de rupture de barrage [4] se déversant sur du fluide au repos, de fermeture brusque complète ou partielle d'une porte [1] ou d'un remplissage de réservoir et d'une reverse dans le canal [7]. Dans notre cas, les deux derniers modes de génération sont testés. Pour la fermeture brutale ou partielle d'une porte, un vérin permet d'actionner la porte verticalement et de la fermer de façon très rapide (environ 0,1 s et avec une vitesse moyenne de descente de 1,25 m/s). Elle génère une onde qui remonte en aval du canal face à l'écoulement principal. Pour la génération par reverse, le débit de l'écoulement est réduit et permet une accumulation du fluide dans le réservoir arrière. Dès que l'énergie potentielle dans le réservoir est supérieure à l'énergie cinétique de l'écoulement, le phénomène de reverse apparaît et génère une onde remontant le courant. Cette méthode s'apparente davantage aux phénomènes de marée mis en jeu dans le processus réel.

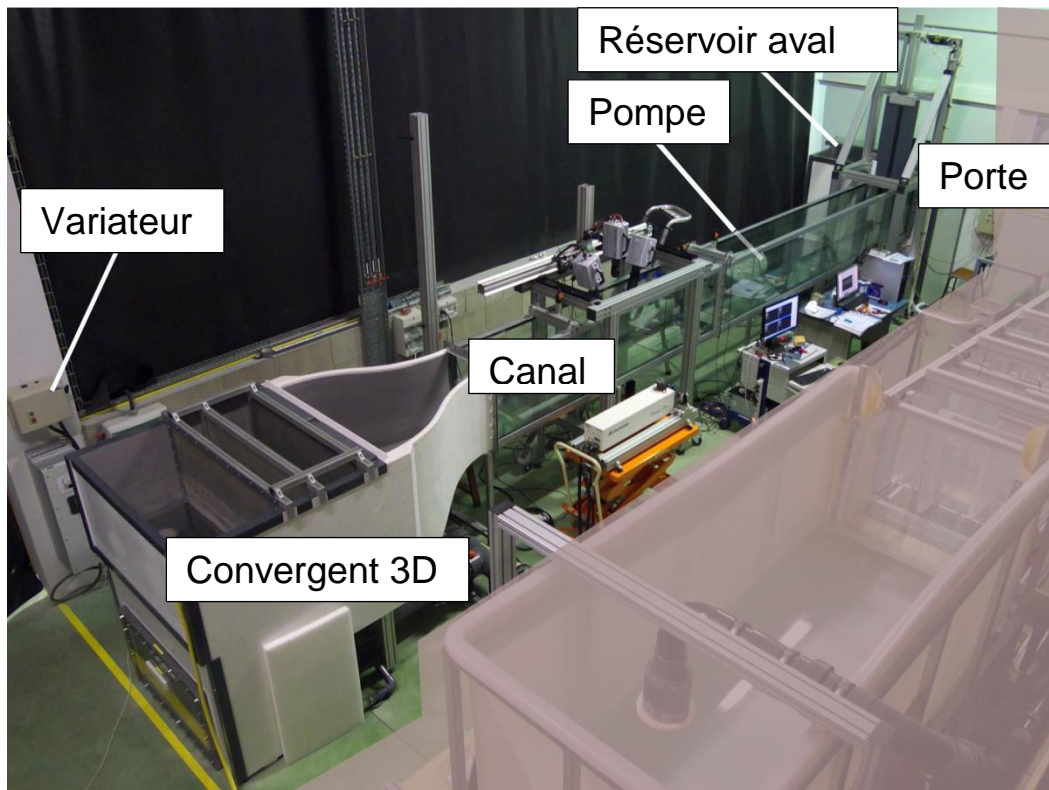


Figure 1 : Visualisation du montage expérimental

2.3 Mesures de hauteur et de vitesse

Les mesures de surface libre sont réalisées soit par capteur acoustique Microsonic mic+25/IU/TC, soit par un algorithme de stéréo-réfraction développé au laboratoire [3]. Pour mesurer la formation

et l'évolution au cours du temps de l'onde générée, plusieurs sondes acoustiques sont placées dans la zone d'étude située à 1,5 m à la sortie du convergent. Elles permettent de relever la position de la surface libre et de mesurer la vitesse du ressaut. Dans cette zone d'étude, le ressaut se déplace à vitesse constante C . Pour les mesures de surface par stéréo-réfraction, l'écoulement est ensemençé avec des particules de PMMA de diamètre moyen de 20 μm dopées à la Rhodamine B pour filtrer les réflexions du laser sur la surface libre avec un filtre interférentiel placé sur les caméras [3]. Un Nd:Yag laser de marque Quantronix, modèle Darwin Duo d'énergie 18mJ permet de générer une nappe horizontale à une hauteur de $Z_{ls}=35\text{mm}$ par rapport au fond du canal. Trois caméras Photron APX-RS équipées d'un objectif de focal 105 mm sont placées au-dessus de la surface libre (une caméra verticale Cam-2 et les deux autres Cam-3 et Cam-4 à plus ou moins 20° par rapport à Cam-2) et une caméra Cam-1 équipée d'un objectif de focal de 60 mm est positionnée en dessous du canal pour enregistrer le motif de référence obtenu à chaque instant par l'éclairage laser (Figure 2). La taille de l'enregistrement (ROI) est de 110 mm x 110 mm.

Les mesures de vitesse sont réalisées dans un plan vertical par Vélocimétrie par Imagerie de Particules résolue en temps (PIV-RT) au moyen du même laser Nd:YLF Quantronix® pour les deux modes de génération (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'acquisition se fait avec une caméra Photron APX-RS à une fréquence de 250 images par seconde, ce qui permet un suivi temporel du ressaut à partir de sa génération sur une région de 80 mm x 80 mm. Les images sont ensuite analysées au moyen d'un algorithme de PIV-RT basé sur la moyenne d'ensemble des signaux de corrélation obtenus sur les trajectoires fluides des particules de type polynomiale [6]. Sept images successives et un polynôme d'ordre 2 sont employés pour approximer les trajectoires fluides et en déduire la vitesse et l'accélération Lagrangienne dans une fenêtre de taille finale 32 x 32 pixels. La surface libre dans le cas des plans de mesure verticale est obtenue à partir des hauteurs mesurées par les capteurs acoustiques placées de part et d'autre de la zone de mesure [2] ou par un postraitement morphologique des images enregistrées.

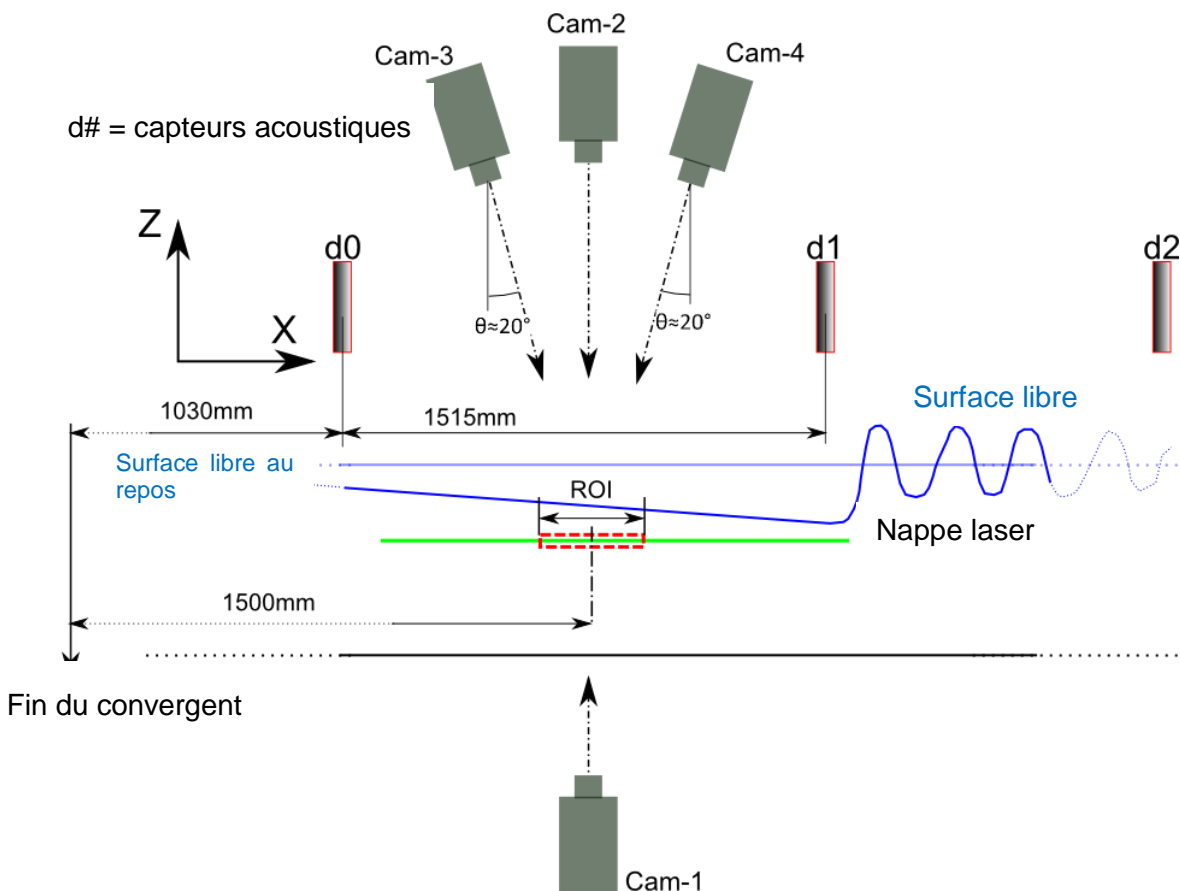


Figure 2 : Montage expérimental pour les mesures de stéréo-réfraction.

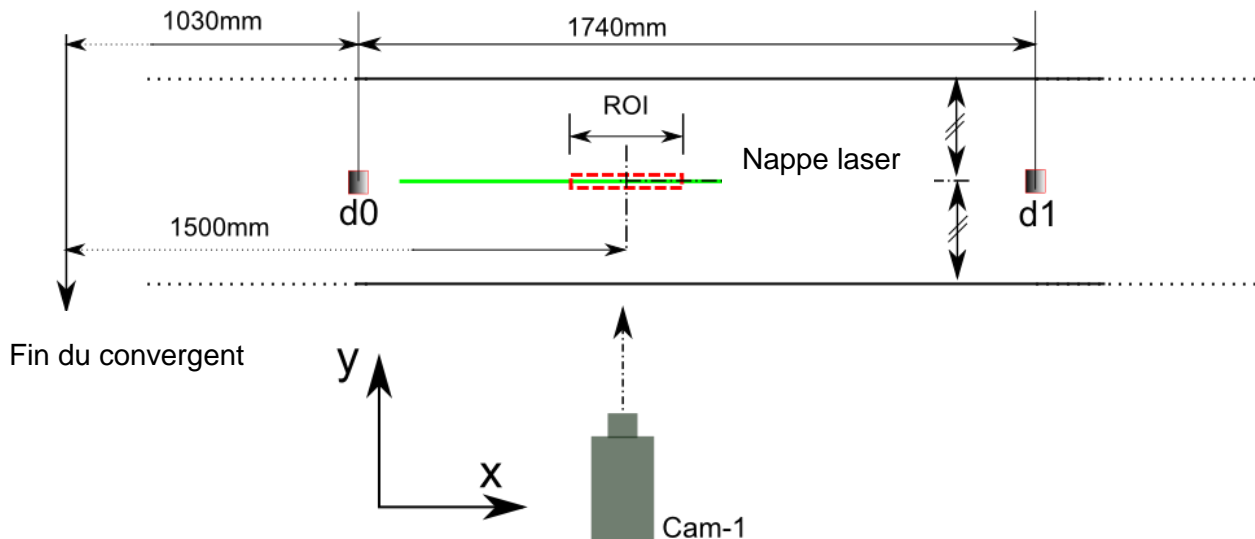


Figure 3 : Montage expérimental pour les mesures de PIV-RT dans le plan vertical.

3 Résultats

Tout d'abord nous présentons les résultats issus de la génération par la reverse du réservoir aval. Ensuite, une comparaison entre les deux modes de génération sera faite.

3.1 Etude du mascaret généré par la reverse du réservoir aval

On cherche tout d'abord à caractériser l'évolution de la surface libre au cours du temps. La technique de stéréo-réfraction nous permet de mesurer l'évolution de la surface libre pour une région de $60 \times 80 \text{ mm}^2$. La hauteur varie avec le passage du mascaret mais de façon identique selon y ce qui traduit bien une propagation des ondes principalement suivant z . Dans ce cas le train d'ondes est composé d'ondes de grandes amplitudes sur lesquelles se superposent des ondes capillaires. Celles-ci de faibles amplitudes et de petites longueurs d'ondes se situent proches du maximum d'amplitude plutôt en amont. Celles-ci sont visibles sur les visualisations mais ne peuvent être mesurées avec la technique de stéréo-réfraction (Figure 4) qui accepte des pentes limites avec cette taille de champ bien inférieure. A noter également que le capteur acoustique intègre sa mesure sur 1 cm^2 environ et n'arrive pas à mesurer ces ondes capillaires comme on peut le voir sur la Figure 5. La comparaison entre les deux techniques est en bon accord même si d'une part le signal de stéréo réfraction reste plus bruité notamment dans les régions de fortes amplitudes. D'autre part, le signal acoustique est une interpolation entre les signaux mesurés par les sondes placées de part et d'autre de la zone mesurée.

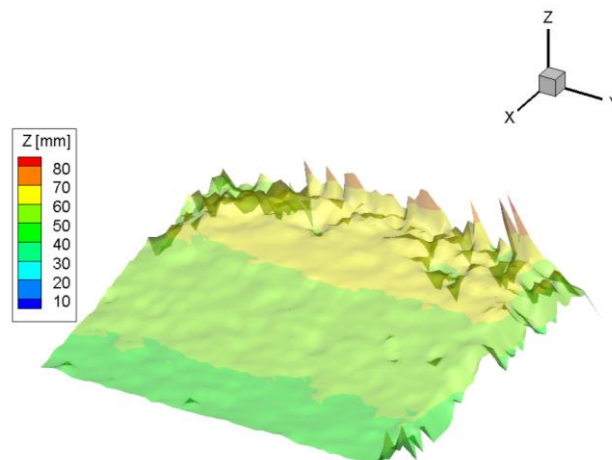


Figure 4 : Champ instantané de hauteur d'eau mesuré par stéréo-réfraction à l'arrivée de la première onde.

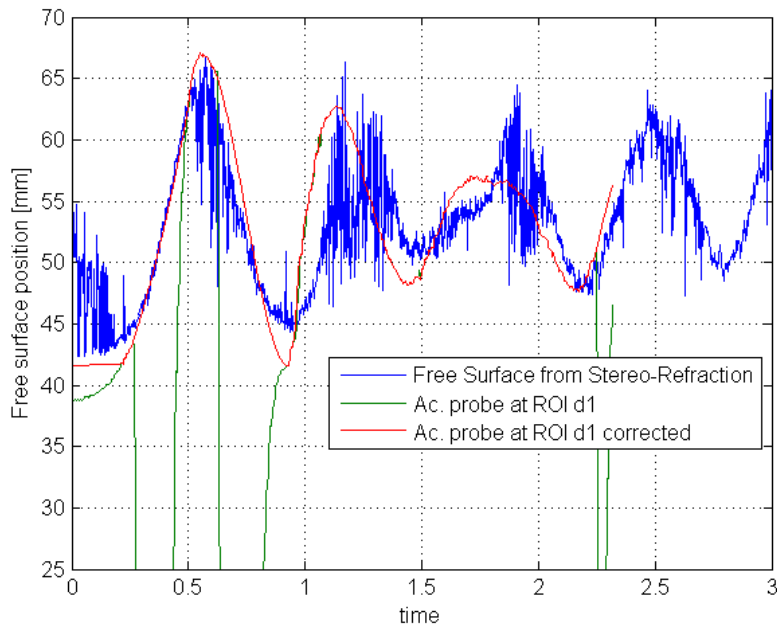


Figure 5 : Comparaison des signaux mesurés en fonction du temps par la sonde acoustique (signaux interpolés) et par stéréo-réfraction (signaux bruts) pour la position centrale de la zone de mesure

La Figure 6 présente l'évolution temporelle et spatiale du mascaret dans la zone mesurée par TR-PIV. L'instant initial bien en amont de l'arrivée du mascaret est noté ici t_0 traduit l'état initial du canal. La hauteur initiale est de 38 mm. L'arrivée de la première éteule entraîne un ralentissement progressif et rapide de la vitesse dans la colonne d'eau. La norme de la vitesse diminue principalement au sommet de l'éteule et la zone de couche limite est soulevée au passage de l'onde laissant la place à du fluide qui remonte de l'aval. Cette zone dépressionnaire est plaquée vers le fond du canal ensuite lorsque la hauteur de l'onde diminue en générant une couche limite fortement perturbée. Cette couche limite croit au fur et à mesure du passage des éteules pour perturber alors l'ensemble de la colonne d'eau.

3.2 Génération du mascaret par fermeture brutale de la porte et comparaisons

Le second mascaret est généré avec des conditions hydrauliques légèrement différentes. Le même nombre de Froude est obtenu mais à partir d'une hauteur d'eau initiale légèrement plus faible et d'un débit de fuite sous la porte. La vitesse de l'écoulement principal est légèrement plus faible mais la vitesse de propagation de l'onde U est plus rapide. La vitesse plus rapide de l'onde agit directement sur l'écoulement car dans ce cas (Figure 7) la vitesse devient très faible dans toute la colonne d'eau au passage de l'onde ce qui ne génère pas de décollement complet de la couche limite avec aspiration du fluide mais seulement un étirement progressif de celle-ci. Deux zones de faible vitesse apparaissent en haut de la colonne d'eau et au fond et ces zones tendent à se rejoindre au passage des différentes ondes. L'amplitude des ondes est globalement similaire entre les deux modes de génération.

4 Conclusion

Deux modes de génération d'un ressaut mobile s'approchant d'un mascaret ont été proposés dans ce travail pour un même nombre de Froude et une même hauteur d'eau. La première méthode qui s'approche davantage des conditions naturelles consiste par la diminution du débit dans le canal à augmenter la hauteur d'eau dans le réservoir aval pour qu'à partir d'une certaine hauteur, le fluide se déverse et remonte en amont. La seconde plus classique consiste à fermer brutalement une porte pour générer une onde alimentée par le débit court-circuité. L'étude a été réalisée par

des mesures de stéréo-réfraction pour le premier mascaret et des mesures de vitesse pour les deux écoulements par TR-PIV. Les résultats montrent une évolution ondulatoire assez proche avec des amplitudes d'ondes très proches alors que la différence de vitesse de propagation du fond combinée avec une différence de vitesse initiale génère une évolution et une déstructuration de la couche limite très différente entre les deux cas. Cela laisse sous-entendre que le nombre de Froude n'est pas le seul nombre caractéristique à prendre en compte pour ce type d'écoulements et un travail plus conséquent sur les nombres adimensionnés caractéristiques devra être entrepris.

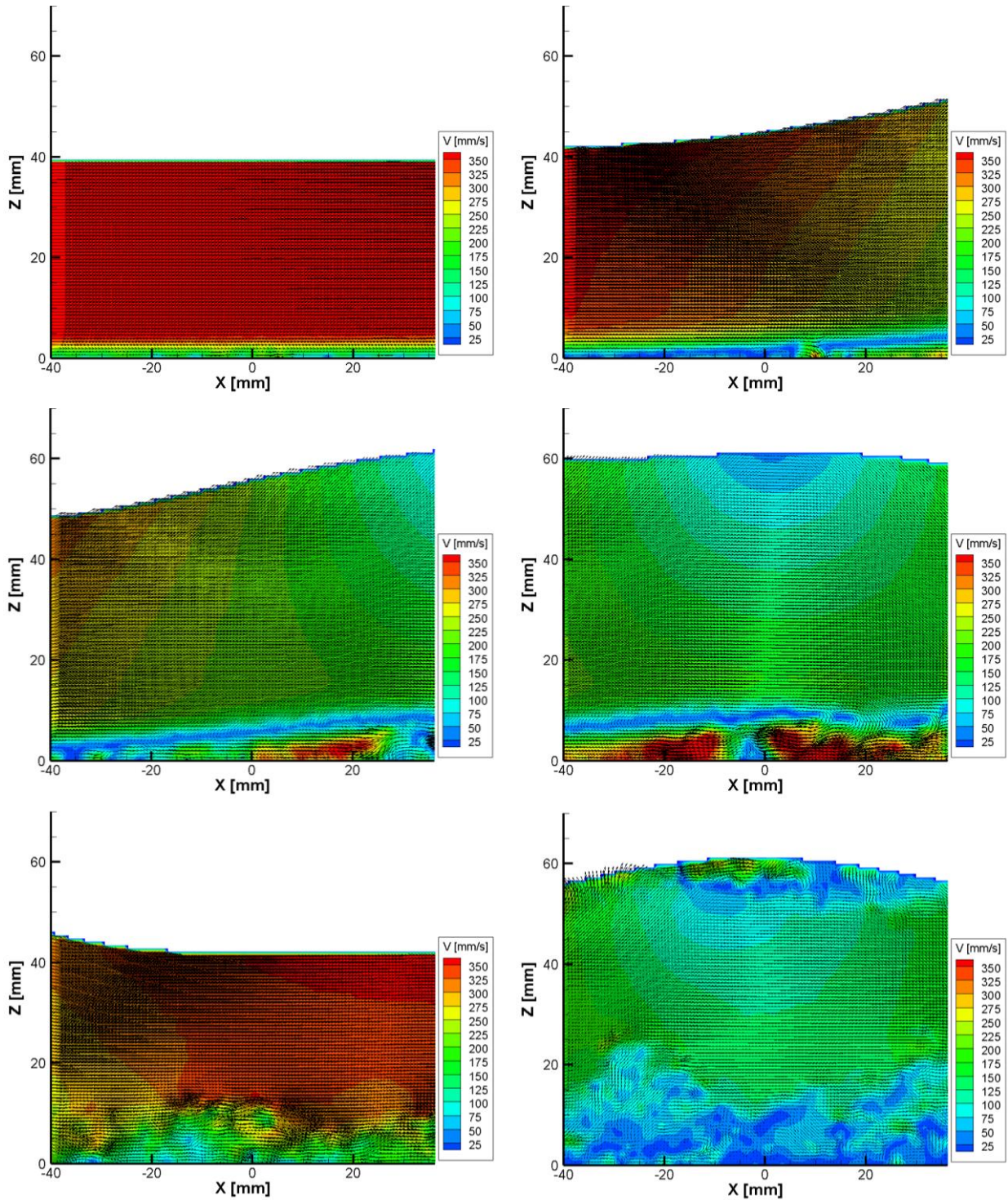


Figure 6 : Evolution du mascaret en fonction du temps avec la méthode de surverse [7]

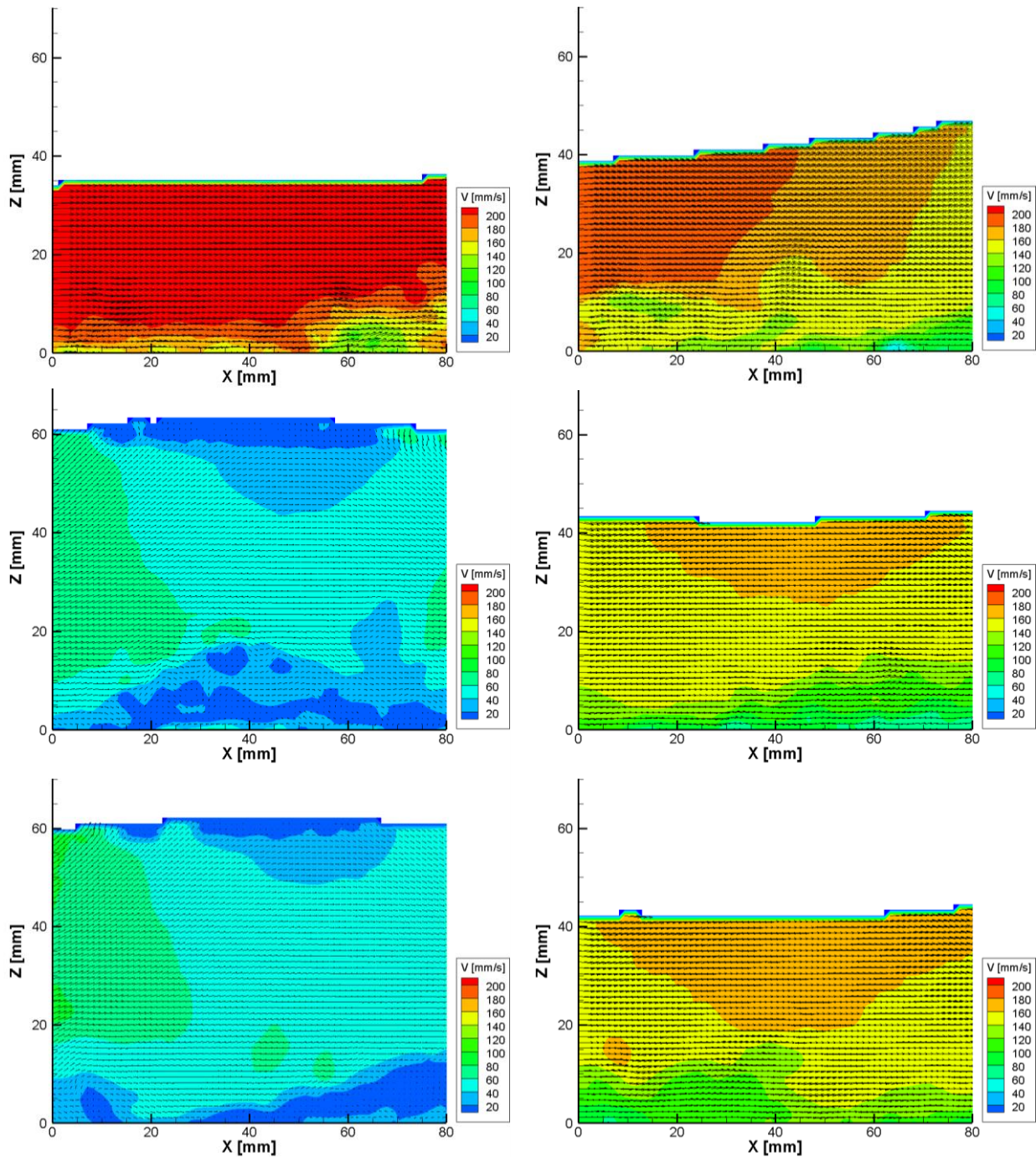


Figure 7 : Evolution du mascaret en fonction du temps avec la fermeture de porte [1][2]

5 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Nationale pour la Recherche pour son soutien financier au travers du projet blanc MASCARET 10-BLAN-0911, ainsi que le FEDER et la Région Poitou Charentes.

6 Références

- [1] Koch C., Chanson H., (2009). Turbulence measurements in positive surges and bores. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 47, No. 1, pp. 29–40.
- [2] David L., Chatellier L., Calluau D., Rousseaux G., Thomas L., 2014: Etude du mascaret en laboratoire. 14ième Congrès Francophone de Techniques Lasers. Marseille, 15-19 septembre 2014
- [3] [Gomit G., Chatellier L., Calluau D., David L., 2013: Free surface measurement by stereo-refraction. Experiments in Fluids, 54-1540, 11 pages](#)
- [4] [Hornung HG., Willert C., and Turner S., 1995. The flow field downstream of a hydraulic jump. J. Fluid Mech, Vol 287, pp. 299-316.](#)
- [5] [Huang J., Pan CH, Kuang CP, Zeng J, Chen G, \(2013\). Experimental hydrodynamic study of the Qiantang River tidal bore. Journal of hydrodynamics, 25\(3\):481-490](#)
- [6] [Jeon Y. J., Chatellier L., David L., 2014: Fluid trajectory evaluation based on an ensemble-averaged cross-correlation in time-resolved PIV. Exp. Fluids 55:1–16.](#)
- [7] [Rousseaux G., Mougenot J.M., Chatellier L., David L., Calluau D., 2016: A novel method to generate tidal bores in the laboratory. European Journal of Fluid Mechanics. Volume 55, Part 1, pp 31-38](#)