Suivi de l'impact de vagues sur une paroi par traitement d'image

H.H.NGUYEN

Laboratoire Mécanique, Physique et Géosciences (LMPG) Université du Havre <u>huu-ha.nguyen726@univ-lehavre.fr</u>; <u>huuhak39@yahoo.com</u>

1. <u>Résumé</u>

Les oscillations de la surface libre (interface eau-air) provoquée par les vagues sont des fonctions spatio-temporelles habituellement suivies par des sondes résistives en canal de laboratoire. Ceci permet d'avoir une très bonne résolution temporelle grâce au large choix de la fréquence d'échantillonnage. Par contre, une bonne résolution spatiale nécessite un grand nombre de sondes, ce qui est difficile à réaliser avec les sondes résistives classiques.

Inspiré du fonctionnement des sondes résistives, le suivi de la surface libre par traitement d'image a pour but d'améliorer la résolution spatiale en utilisant une colonne de pixels comme une sonde résistive. Chaque colonne de pixels devrait être capable de détecter, temporellement, l'oscillation de l'interface eau/air. La résolution est, alors, définie par le champ de vision de la caméra et le nombre de colonnes du capteur CCD de la caméra qui est de l'ordre de quelques centaines.

2. Introduction

En général, les phénomènes physiques à analyser dans l'étude de l'impact des vagues sur des structures sont : la surpression, le franchissement et l'inclusion d'air dans l'eau. La surpression et la distribution des pressions issues des vagues sont beaucoup abordées par voies expérimentale, analytique et numérique. Cooker et Peregrine [1] ont proposé un modèle analytique pour estimer la pression d'impact des vagues sur une paroi verticale en simplifiant la surface libre et en utilisant la théorie d'impulsion de Lagrange [2]. Ils ont supposé, pour leur modèle, que la surface libre était parfaitement horizontale et le calcul de pression maximale se faisait à travers de celui de l'impulsion. Ce modèle a beaucoup contribué à la recherche de l'interaction vague - structure et est utilisé par d'autres auteurs pour valider leurs résultats. Néanmoins, ce modèle n'est pas du tout réaliste en terme de la surface libre. Chan E-S [3] a réalisé ses expériences en suivant le mouvement de la surface libre qui faisait apparaître des inclusions d'air dans l'eau et également la forme de jet à proximité de la structure. Ces phénomènes provoquent des oscillations dans l'évolution de pression sur la paroi, surtout après le pic d'impact. Ceci a été également confirmé par l'étude de Hattori et ses collègues [4].

En effet, l'impact des vagues sur les structures est caractérisé par la forme de la surface libre. D'où la nécessité d'un outil fiable qui devrait permettre l'enregistrement spatio-temporel la surface libre sur une certaine longueur.

3. La théorie de l'impact des vagues sur les structures

Les écoulements d'un fluide visqueux incompressible sont réagis par les équations suivantes :

$$div\vec{U} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U}.\vec{\nabla})\vec{U} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\overrightarrow{\text{gradp}} + \nu\vec{\Delta}\vec{U}$$
(I)

Pour mettre ces équations sous forme adimensionnelle et étudier les propriétés de similitude de tels écoulements, on introduit les grandeurs caractéristiques de la situation étudiée. Au cas particulier de l'étude d'impact des vagues sur les structures, les valeurs caractéristiques peuvent être : Δt^* la durée de l'impact, L* la longueur d'onde, U* amplitude de la vitesse assez loin de la paroi, g* l'accélération de la pesanteur et $p^*=\rho U^{*2}$.

On pose, alors :

$$t = \Delta t * \overline{t}; x = L * \overline{x}; U = U * \overline{U}$$

$$p = p * \overline{p}; F = g * \overline{F}$$
 (II)

Où les quantités $\overline{t, x, U}, \overline{p}, \overline{F}$ sont, donc, sans dimension.

L'équation de Navier Stokes se réécrit donc sous la forme adimensionnelle :

$$\frac{L^{*}}{\Delta t^{*}U^{*}}\frac{\partial U}{\partial \bar{t}} + \overline{\nabla U}.\overline{U} = \frac{g^{*}L^{*}}{U^{*2}}\overline{F} - \overline{\nabla p} + \frac{\mu}{U^{*}L^{*}}\overline{\Delta U} \quad (III)$$

Posons :

$$S = \frac{L^*}{\Delta t^* U^*}$$
, appelé nombre de Strouhal, qui caractérise les évolutions en fonction du temps

 $Fr = \frac{U^{*2}}{g^*L^*}$, appelé nombre de Froude, qui caractérise le rapport des efforts d'inertie spécifiques

 $U^{*2}L^{*-1}$ aux forces de masse g*.

 $\operatorname{Re} = \frac{U^*L^*}{\mu}$, appelé nombre de Reynolds, qui caractérise le rapport des forces d'inertie aux forces de

viscosité.

L'équation (III) devient, alors :

$$S\frac{\partial \overline{U}}{\partial \overline{t}} + \overline{\nabla}\overline{U}.\overline{U} = \frac{1}{Fr}\overline{F} - \overline{\nabla}\overline{p} + \frac{1}{\text{Re}}\overline{\Delta}\overline{U} \qquad (\text{IV})$$

La durée très brève des pics de pression lors des impacts des vagues conduit à considérer, au moins en première approximation, que S >> 1/Fr et S >> 1/Re. Si de plus on néglige le terme non linéaire d'accélération convective, l'équation de Navier Stokes adimensionnelle se simplifie en :

$$S\frac{\partial \overline{U}}{\partial \overline{t}} = -\overline{\nabla}\overline{p} \quad (V)$$

Sous forme dimensionnelle elle devient :

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = -\vec{\nabla}p \qquad (VI)$$

La forme simplifiée de l'équation Navier Stokes ci-dessus a été utilisée dans le modèle analytique de Cooker et Peregrine [1] pour le calcul des pressions sur les structures engendrées par les vagues. Elle a été résolue en utilisant la théorie d'impulsion de Lagrange et en acceptant les hypothèses subjectives sur l'estimation de la durée d'impact et sur les conditions aux limites.

4. Technique expérimentale de la mesure optique

4.1. Description générale

Les expériences ont été réalisées dans un canal à houle du Laboratoire Mécanique, Physique et Géosciences, de l'Université du Havre. La houle est générée par un batteur oscillant dont la fréquence est réglable, installé à une extrémité du canal. Une structure parallélépipède a été, également, fixée à l'autre extrémité précédée d'un fond incliné avec une pente de 1 :10. Le champ de vision à étudier, zone proche de la structure, est observable grâce à un ensemble de draps noirs mats. Le milieu liquide est coloré par de la fluorescéine qui est excitée par un plan laser Argon vertical. La scène est enregistrée par un caméscope positionné sur le côté du canal qui permettra un traitement d'image sur ordinateur par la suite. Les dimensions du capteur CCD utilisé sont 720x576.



Figure 1 : Schéma du matériel à utiliser

4.2. Méthode expérimentale



Figure 2 : Image représentative des séries d'images obtenues

La détection de l'interface se réalise en analysant l'intensité lumineuse enregistrée par le caméscope. Sur une colonne, les intensités lumineuses des pixels correspondant soit au milieu liquide, soit au milieu gazeux, varient modérément en raison de la bonne homogénéité de chaque milieu en terme de la luminosité. La variation brutale de l'amplitude d'intensité au niveau de l'interface permet de déterminer précisément, de l'ordre de trois pixels, la position de la surface libre à travers d'une analyse des gradients d'intensité. Sur chaque colonne, le pixel dont le gradient est le plus important par rapport aux autres sera désigné comme le niveau de l'interface eau/air.



Figure 3 : Profil d'intensité typique sur une colonne de pixel



Figure 4 : Gradient d'intensité typique sur une colonne de pixel

Pour convertir l'unité pixel en l'unité réelle, une procédure de calibration est, bien évidemment, indispensable. Celle-ci consiste à mettre une grille des points équidistants de 10 mm dans la zone visée par la caméra dont la position doit être constamment fixée pour toutes les étapes. L'image de la grille des points obtenue permet une conversion unité pixel – unité réelle qui dépend fortement de la distance de travail entre la caméra et la grille ainsi que du zoom utilisé. Pour les essais présentés ci-après, à un pixel correspond une distance de 0,6mm.

4.3. Désentrelacement d'image et fréquence d'échantillonnage de la mesure optique

En Norme Européenne, la fréquence d'une caméra normale est normalisée à 25 Hz. Néanmoins, la fréquence réelle du fonctionnement d'une caméra dépend directement de celle de la source d'électricité sur laquelle elle est branchée. En France, EDF fourni un courant d'électricité de 50 Hz. La caméra européenne se lance, donc, toutes les 1/50 secondes. Chaque image sortie d'une caméra 25 Hz est composée de deux demi images enregistrées à deux instants qui se séparent de 1/50 secondes. Une de ces deux demi images contient entièrement les lignes impaires de pixels et l'autre contient toutes les lignes paires. Elles sont entrelacées toutes les 1/25 secondes.

Cet entrelacement peut engendrer un flou lorsque la différence des objets visés en 2 instants est considérable. Ceci est couramment vu au cas du mouvement rapide.



Figure 5 : Images brutes horizontale et verticale

Pour éviter la mauvaise détection à cause de ce problème, un autre traitement a été proposé. Au lieu d'avoir les images horizontales, la caméra a été tournée de 90° pour enregistrer les images verticales dans lesquelles chaque ligne contient exactement les informations de la houle à un instant unique. Les deux lignes adjacentes (paire et impaire) contiennent les informations de la houle des deux moments différents. Donc, la résolution temporelle est doublée en utilisant une interpolation entre toutes les lignes paires et entre toutes les lignes impaires, ce qui est acceptable grâce à un faible gradient d'amplitude entre deux lignes voisines. En effet, la forme spatiale de la surface libre est suivie toutes les 1/50 secondes sur un champ de vision de la caméra.



Figure 6 : Exemple de la détection spatiale de la surface libre

4.4. Validation de la mesure optique

La mesure de la surface libre par traitement d'image a été, expérimentalement, validée en comparant les résultats issus d'elle avec ceux issus des sondes résistives. En effet, la même oscillation de la surface libre en fonction du temps a été suivie en même temps par une sonde résistive et par mesure optique.



Figure 7 : La disposition du matériel pour l'essai comparatif

Les cinq essais ont été réalisés en utilisant les deux techniques simultanément. La fréquence d'acquisition de la sonde résistive a été choisie identique du caméscope soit 50 Hz. Le nombre de données acquises était de 2500 dont chacune était la moyenne des valeurs obtenues sur les rangées paires ou impaires qui se trouvaient entièrement dans la sonde. Chaque image donnait deux valeurs issues des paires et des impaires. L'évolution temporelle obtenue, a été, donc, à la fréquence de 1/50 Hz.



Figure 8 : Exemple d'un essai comparatif des techniques de mesure

L'identité des données issues de la sonde et du traitement d'image a été confirmée par le coefficient de corrélation calculée comme suit :

$$R = \frac{\sum_{1}^{n} (X - X_m)(Y - Y_m)}{\sqrt{\sum_{1}^{n} (X - X_m)^2 \times \sum_{1}^{n} (Y - Y_m)^2}} = 0,99 \quad \text{(VII)}$$

Où : X: la séquence des valeurs obtenues par la sonde ; X_m : la moyenne de X

Y: la séquence des valeurs obtenues par le traitement d'image ; Y_m: la moyenne de Y

En général, le suivi de la surface libre par traitement d'image présente un faible écart (moins de 2%) par rapport à la technique classique avec les sondes résistives. Elle peut être expliquée par celle de la procédure d'étalonnage, par perturbation transversale de la houle, par qualité d'image, par défaut du lissage...Pourtant, ses avantages en terme de la résolution spatiale en font toujours un très bon outil pour analyser l'oscillation de l'interface sur tout le champ de vision de la caméra.

5. Application à la répétabilité des impacts de vagues

Notre objectif à terme est d'analyser les caractéristiques des impacts de vague sur une structure en fonction de divers paramètres, par exemple géométrique. Afin de mesurer les effets de ces paramètres, il est nécessaire de réaliser les expériences très reproductibles. Dans notre problème particulier d'impact de vague, la question posée est : quelle dispersion sur l'évolution spatio-temporelle de la surface libre obtient-t-on en réalisant plusieurs expériences avec les mêmes conditions aux limites et initiales qui sont : la hauteur d'eau au repos, l'amplitude du mouvement du batteur, la fréquence oscillant du batteur, la distance de l'obstacle par rapport au batteur, la position initiale du batteur.

Pour statuer cette répétabilité, nous avons réalisé une série de dix essais en mesurant l'évolution de la surface libre avec la méthode optique présentée précédemment.

5.1. Analyse spatio-temporelle

La figure ci-dessous présente le résultat obtenu pour l'évolution temporelle de la surface libre à environ 77mm de la paroi verticale. Pour faciliter la visibilité, les seules 5 courbes sont présentées ci-dessous parmi 10 essais réalisés.



Figure 9 : Evolutions temporelles de la surface libre sur le même endroit

La figure suivante présente les formes spatiales de la surface libre dans le champ de la vision de la caméra à un instant donné où les houles sont générées sous les mêmes conditions.



Figure 10 : Formes spatiales de la surface libre momentanée

5.2. Analyse des caractéristiques de houle

Comme la figure le montre, l'évolution temporelle présente des harmoniques. Une analyse spectrale de la houle en x donné conduit à l'expression :

$$\eta(t) = a_1 \sin \omega t + \sum_{i=2}^{n} a_i \sin i \omega t$$
 (VIII)

Les transformations de Fourrier des signaux précédemment obtenus à 77mm de la paroi verticale nous donnent le tableau suivant d'amplitude et de fréquence.

Essai	Fondamental		Harmoniques						
	a ₁ (mm)	f ₁ (Hz)	$a_2(mm)$	f ₂ (Hz)	a ₃ (mm)	f ₃ (Hz)	a ₄ (mm)	f ₄ (Hz)	
1	18.890	1.016	2.046	2.031	1.847	3.052	0.958	4.068	
2	19.107	1.016	2.257	2.031	1.923	3.052	1.038	4.070	
3	19.140	1.016	2.243	2.032	1.938	3.054	1.035	4.068	
4	19.167	1.016	2.241	2.032	1.904	3.054	0.998	4.068	
5	19.199	1.016	2.242	2.032	1.941	3.053	1.034	4.063	
6	19.166	1.016	2.267	2.031	1.861	3.050	0.991	4.064	
7	19.163	1.016	2.234	2.032	1.913	3.050	0.974	4.064	
8	19.171	1.016	2.221	2.031	1.866	3.049	0.971	4.064	
9	19.169	1.016	2.219	2.031	1.919	3.054	0.985	4.064	
10	19.134	1.016	2.247	2.032	1.874	3.050	0.979	4.063	

Les résultats obtenus nous ont assuré la répétabilité des houles. La forme de la surface libre reste quasiment inchangée lors que les conditions d'essai sont les mêmes. Ceci entraîne l'impact constant de la houle sur la structure.

6. Application à analyse de l'effet d'aération sur l'impact

La présence d'inclusions d'air dans le milieu liquide peut avoir des effets importants sur la distribution de pression et l'intensité du pic de pression lors des impacts de vagues sur une paroi [3], [4]. En nature, ces inclusions d'air proviennent du déferlement et par conséquent, les tailles des inclusions, leur distribution spatiale, leur évolution temporelle associée aux problèmes d'instabilité donnent un caractère assez aléatoire à leurs effets.

Afin de réaliser une analyse paramétrique des effets sur l'impact d'une aération du milieu liquide, nous avons testé des cas d'impact sans déferlement afin de limiter les difficultés et d'obtenir une quantification assez précise de ces effets notamment sur l'évolution spatio-temporelle de la surface libre. En effet, le suivi de l'interface air-eau en cas de déferlement en canal à houle est un problème délicat à traiter.

Pour réaliser cette analyse paramétrique, il est nécessaire de contrôler entre autres la quantité d'air injecté dans le milieu liquide et sa localisation. Réaliser une électrolyse de l'eau nous a semblé être une méthode très intéressante des ces points de vue. Aussi nous avons installé au pied de la paroi verticale sur le fond incliné du canal une série de six électrodes alimentées par un courant continu permettant d'obtenir un nuage de bulles d'hydrogène et d'oxygènes réalisant une aération relativement homogène du milieu fluide.



Figure 11 : Bulles hydrogènes et oxygènes par électrolyse

Puisque on a montré que notre installation expérimentale et nos protocoles d'essais nous donnaient une très bonne répétitivité des impacts nous réalisé des essais comparatifs entre un cas sans aération et un cas avec génération de bulles avec des conditions aux limites et initiales identiques.

La figure suivante présente la superposition des évolutions temporelles de la surface libre à environ 13 mm de la paroi verticale.



Figure 12 : Evolutions temporelles aux cas sans bulle et avec bulle

Le tableau suivant donne les amplitudes et fréquences mesurées du mode fondamental et des harmoniques dans les deux cas.

	Fondamental		Harmoniques						
	$a_1(mm)$	f ₁ (Hz)	$a_2(mm)$	$f_2(Hz)$	a ₃ (mm)	f ₃ (Hz)	a ₄ (mm)	f ₄ (Hz)	
Sans bulle	34.552	1.108	17.430	2.035	6.213	3.053	1.441	4.070	
Avec bulle	34.198	1.108	17.496	2.035	6.289	3.053	1.273	4.071	







Figure 13 : Forme spatiale momentanée de la surface libre sans bulle et avec bulle

De ces résultats on déduit que l'aération du milieu fluide réalisé au cours de ces expériences n'a quasiment aucun effet sur l'impact des vagues sur la paroi. Ceci indique que ce n'est certainement pas la bonne méthode pour étudier l'effet de l'aération sur les impacts. On peut imaginer plusieurs raisons : une taille de bulles beaucoup trop petite (donc très raides), un volume d'air inclus trop faible, une distribution trop uniforme des bulles,....

Pour continuer dans la voie d'une aération contrôlée du milieu fluide en se rapprochant des conditions rencontrées dans le cas du déferlement il conviendrait de tester des dispositifs d'injection d'air par buses permettant la production de bulles beaucoup plus grosses. Nous en sommes à cette étape.

Références

1. M.J. Cooker and D.H. Peregrine (1990) A model for breaking wave impact pressures

Proc. 22nd Internat. Conf. Coastal Eng. Delft A.S.C.E 2 : 1473-1486

2. J.L. Lagrange (1783) Mémoire sur la théorie du movement des fluids

Nouv. Mem. de l'Acad. de Sci. De Berlin, 12, P151-188

3. Chan E-S (1994) Mechanics of deep water plugging-wave impacts on vertical structures

Coastal Engineering, 22: 115-133

4. M. Hattori, A. Arami, T. Yui (1994) Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types

Coastal Engineering, 22: 79-114

5. RA Bagnold (1939) Interim report on wave-pressure research

Proc. Inst. Civ. Eng., 12: 201-226