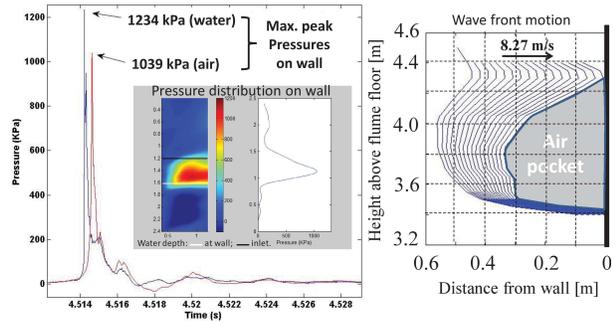


Modélisation de l'impact des vagues sur un mur vertical



Le ministère des transports du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique, Québec

Tâche	Personnes responsables	Date	Détails du rapport
Préparé par :	Frandsen, J. B. & Bérubé, F.	20/04 2015	Version : 1
Vérifié par :	Tremblay, O. G. & Xhardé, R.	21/04 2015	Date de la version : 22/04 2015
Accepté par :	Frandsen, J. B.	22/04 2015	Project no. : R749.1
Approuvé par :	Frandsen, J. B.	22/04 2015	LHE Doc. no. : 000002
Traduit par :	Tremblay, O. G. & Xhardé, R.	21/04 2015	Version originale : anglais

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2015
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-888-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018

Résumé

Ce rapport présente des expériences à grande échelle d'impacts de vagues sur un mur suivant leur remontée le long d'une plage composée d'un mélange de sable, de gravier et de galets. Cette étude s'intéresse à la connaissance avancée des variations rapides de pression en magnitude et de sa distribution sur différents types de mur en mer, en rivière ou portuaire. La protection contre les événements extrêmes et l'érosion côtière qui peut s'en suivre constitue une application majeure. Les tests ont été effectués dans le nouveau canal à vagues du Laboratoire hydraulique environnemental à Québec (Canada) (<http://lhe.ete.inrs.ca>).

Ici sont présentés les résultats découlant des tests préliminaires effectués à l'automne 2014. Les séries de tests se concentrent sur la prédiction des forces sur des murs verticaux. Spécifiquement, 27 capteurs de pression sont distribués sur trois colonnes et montés sur le mur de sorte qu'ils couvrent une aire centrale de 1.2 m de large et 2.4 m de haut sur une plaque d'aluminium renforcée. Pour couvrir toute la largeur du canal (sur 5 m), des pans de mur faits en acier sont ajoutés dans les zones externes. Le mur est conçu de façon à se comporter comme une plaque rigide. Le facteur d'échelle géométrique entre le modèle et l'échelle réelle est autour de 1:4. Les vagues incidentes se développent d'abord sur un fond plat, puis grimpe une plage de 25 m possédant une pente de 1:10. La profondeur d'eau est constante, à $h_0 = 3.8$ m. Un petit train de vagues régulières incidentes avec une certaine gamme de hauteurs, 0.85 m $< H_0 < 1.3$ m, forme la base de la présente étude des forces résultantes sur le mur. L'amplitude des vagues incidentes est modérée avec un nombre d'Ursell allant de $18 < U_r < 30$, une profondeur d'eau intermédiaire de $0.107 < \frac{h_0}{L} < 0.109$ (où L est la longueur d'onde) et un déferlement au mur à de faibles profondeurs, $0.021 < \frac{h_w}{L} < 0.034$. Le nombre de Froude des tests relié à la surface libre au pied de la plage est de $0.14 < Fr < 0.23$.

Les résultats préliminaires rapportés sont basés sur une sélection de six séries de tests (18 impacts sur 150). Le mécanisme sous-jacent de différents types de déferlement et d'impact sur le mur sera discuté. Premièrement, il a été trouvé que les vagues incidentes d'amplitude maximale ne sont pas nécessairement les plus critiques puisque les vagues peuvent déferler avant d'atteindre le mur. Les cas critiques trouvés sont associés à des déferlantes plongeantes déferlant près du mur $\frac{x_b}{H_b} < 1$ à des profondeurs de $\frac{h_w}{h_0} < 1$ (où H_b est la hauteur de la déferlante, x_b la position du déferlement par rapport au mur et h_w est la profondeur au pied du mur). Les poches d'air emprisonnées sous les déferlantes contribuent à l'énergie du jet à travers des effets de compressibilité et de physique reliée à l'explosion de ces poches d'air, même si elles sont petites. En général, des pressions sur le mur plus grande que 1 MPa et des jets de 10 m de haut se développent facilement, même pour des vagues d'amplitude modérée à l'entrée. Le pic de pression maximal identifié sur le mur, avec une plage composée d'un mélange de gravier, était de 1.2 MPa et durait 0.1 ms à l'intérieur d'un triple pic de pression. Il a été causé par une déferlante plongeante avec une poche d'air relativement grande et la pointe de la crête située sur le haut du mur. Il a en plus été observé que le pic de pression maximal dans l'eau était du même ordre de grandeur que la pression maximale dans la poche d'air. Par ailleurs, il a pu être observé qu'une pression maximale sur le mur n'engendre pas nécessairement les vitesses de jet les plus grandes (équivalent à la force verticale considérée dans la conception des déflecteurs). Ce sont des variables indépendantes dans ces processus d'interaction très aléatoires comportant des structures d'écoulement variant rapidement. La vitesse de jet maximale était de l'ordre de 34 m/s, mais pourrait être plus élevée sur une surface de plage différente (une surface rigide et régulière résultant en de plus grands maximums). Pour cet impact, on retrouvait deux pics de pression quasi simultanés générés par une déferlante plongeante avec deux poches d'air relativement petites.

Le dernier point et non le moindre, un moment de renversement maximal équivalent à 87 MNm/m et une force de cisaillement au pied du mur équivalent à 15.4 MN/m à l'échelle réelle (huit fois plus grand qu'une étude à échelle réduite 1:10.3 a révélé) ont été identifiés. Un affouillement local important pouvait aussi être observé au pied du mur. Une protection contre l'affouillement est requis pour ce type de mur afin de maintenir sa stabilité.

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	i
Nomenclature	iii
1 Introduction	1
2 Montage expérimental	6
3 Séries de tests	10
4 Discussion et résultats	12
5 Résumé des observations et des résultats	23
6 Améliorations et recommandations pour des travaux futurs	25
Bibliographie	26
Annexe	27
A Données de pression sur le mur	
Description des données électroniques	28

Nomenclature

Romain

g	Constante gravitationnelle (9.81 m/s ²).
Fr	Nombre de Froude (échelle de longueur basée sur la largeur du canal, 5 m).
h_0	Profondeur d'eau totale.
h_{mur}	Hauteur du mur.
h_w	Profondeur d'eau totale au mur.
H_0	Hauteur de la vague incidente au pied de la plage.
H_{max}	Hauteur maximale de la vague.
H_b	Hauteur de la déferlante.
L	Longueur d'onde des vagues régulières individuelles.
M_o	Moment de réaction au bas du mur dû à la pression sur le mur.
P_w	Pression pariétale (sur le mur).
t	Temps.
R	Distance verticale de la montée du jet.
S_F	Force de réaction au bas du mur due à la pression sur le mur.
T	Période des vagues régulières individuelles.
u	Vitesse horizontale dans la colonne d'eau.
V_H	Vitesse horizontale de la vague à l'impact.
V_R	Vitesse verticale du jet.
U_r	Nombre d'Ursell.
x	Distance horizontale (axe dans la direction longitudinale du canal).
x_b	Distance horizontale entre le point de déferlement et le mur.

Abbréviations

NME	Niveau moyen de l'eau.
-------	------------------------

Grecque

$\varepsilon(= \eta_{max}/h_0)$	Paramètre caractérisant la cambrure de la vague.
$\varepsilon_w(= H_b/h_w)$	Paramètre caractérisant la cambrure de la vague au mur.

$\mu(= h_0/L)$	Paramètre de dispersion en eau peu profonde.
ν	Viscosité cinématique ($\frac{\mu}{\rho}$).
ρ	Masse volumique (eau : 1025 kg/m ³ ; air : 1.23 kg/m ³).
η_{max}	Amplitude maximale des vagues.
θ	Pente de la plage.

Indice

p	Prototype.
m	Modèle.

Chapitre 1

Introduction

Beaucoup de littoraux subissent les conséquences graves des débordements de tempête et des inondations. Pour protéger les villes contre les vagues de tempête, il peut être nécessaire d'installer des structures côtières ou d'utiliser des méthodes douces. Le présent travail est motivé par diverses défaillances de murs utilisés dans un contexte de protection côtière, comme celle illustrée à la Fig. 1.1. Alors qu'il peut relativement être facile de détecter des défaillances structurelles dans le sillage d'une tempête, il est beaucoup plus difficile de prédire les forces maximales sur des murs portuaires, en mer ou en rivière.



FIGURE 1.1: Exemple de défaillance d'un mur côtier.

Ce rapport se concentre sur le comportement d'un mur vertical idéalisé sujet à des vagues de grande amplitude et situé au haut d'une plage. Pour ces études, les expériences



FIGURE 1.2: Vue d'ensemble du canal, incluant un instantané d'impact de vague sur le mur.

à grande échelle ont été montées dans le nouveau canal à vagues à Québec (Canada). Le canal a une section de 5×5 m et une longueur de 122 m (Fig. 1.2).

Le canal est conçu pour modéliser l'interaction entre les vagues, les courants et le transport des sédiments. Les profondeurs d'eau opérationnelles pour l'étude des vagues, combinées ou non avec des courants, se situent entre 2.5 et 3.5 m. Le batteur à vagues est de type piston et possède une course maximale de 4 m ainsi qu'une vitesse maximale de 4 m/s. Il a été développé par MTS et peut générer des vagues régulières d'une hauteur maximale de près de 1.5 m dans 3.5 m d'eau, pour des périodes allant de 3 à 10 s. Des conditions de mer irrégulière peuvent également être générées, tout comme une multitude d'autres formes de vague, souvent définies par des fonctions utilisateur. Un système de circulation d'eau en boucle fermée permet d'engendrer des courants bidirectionnels de l'ordre de 1 m/s pour 1 m de profondeur.

La physique associées aux impacts de vague est riche, comme le décrit par exemple les travaux antérieurs de Bagnold (1939), Longuet-Higgins (1974) et Oumeraci *et al.* (1993) pour n'en mentionner que quelques-uns. Plusieurs études récentes présentent des résultats et des discussions intéressantes sur la physique sous-jacente incluant le rôle de l'entraînement d'air dans les déferlantes plongeantes ou les effets de compressibilité qui s'en suivent. Pour de récentes discussions détaillées, il est possible de consulter par exemple les travaux de Peregrine (2003); Abrahamsen & Faltinsen (2011); Kiger & Duncan (2012); Shiravani *et al.* (2014) and Wang *et al.* (2014). Les récentes prédictions numériques de Guilcher *et al.* (2014) apportent aussi davantage d'éclaircissements. Les présentes expérimentations sont difficiles et exigeantes parce que les vagues de moyennes et grandes amplitudes génèrent des pics de pression très élevés qui se produisent sur de très courtes périodes (de l'ordre de la milliseconde). Dans le passé, des expériences similaires ont été menées à grande échelle dans des canaux à Delf (Hofland *et al.*, 2010) et Hanovre (Bullock *et al.*, 2007), mais sur des fonds lisses (réguliers). Des pics de pression de l'ordre de 2.5-3.5 MPa ont été rapportés.

Aujourd’hui, il y a place à l’amélioration en ce qui a trait à la prédiction des forces générées par des impacts de vagues dans la conception de brise-lames et de mur côtier soumis à ce genre d’impact. Nous étudions ici les pressions élevées et leur distribution, variant rapidement dans le temps, découlant d’impact sur un mur dans des conditions équivalentes à des événements de tempête. Parallèlement, nous étudions également les processus physiques du jet et de la montée de la vague (« run-up ») au niveau du mur. En plus, nous avons examiné l’effet d’avoir une plage très dissipative en avant du mur sur les vagues et les pressions engendrées au niveau du mur. Les paramètres physiques clés étudiés incluent :

- La position et la forme du déferlement près du mur ;
- Les pressions sur le mur et l’entraînement d’air ;
- L’hydrodynamique côtière et l’interaction avec le fond marin ;
- La physique des jets et des explosions sous-marines ;
- Les débordements et le drainage de l’eau ;
- Les problèmes d’affouillement local et de déstabilisation du mur.

Les tests menés dans cette étude sont basés sur des petits trains de vagues régulières (trois crêtes dont la hauteur en entrée est de $0.85 \text{ m} < H_0 < 1.3 \text{ m}$ et la période est de $T = 6 \text{ s}$) se propageant dans le canal à des profondeurs intermédiaires, $0.107 < \frac{h_0}{L} < 0.109$ où h_0 ($= 3.8 \text{ m}$) représente le NME et L est la longueur d’onde. Les résultats rapportés sont basés sur une sélection de six vagues incidentes, comme le montre le graphique de la Fig. 1.3. Bien que les tests soient faiblement espacés sur ce graphique, avec une profondeur et une période constante et une hauteur très peu variable, tous les cas présentent des distributions de pressions pariétales pendant l’impact et des jets très différents. Les impacts #6 et #7, qui présentent les pressions pariétales maximales de même que les paramètres de jets maximaux sont mis en évidence en rouge sur la Fig. 1.3. Il sera démontré que la forme des vagues, la hauteur des déferlantes, H_b , et la position du déferlement, x_b , sont des paramètres de grande importance dans le processus d’identification des causes des maximums de pression pariétales et des paramètres de jet maximaux.

Lorsque les vagues remontent la plage, elles entrent dans une eau peu profonde ($\frac{h_0}{L} < \frac{1}{20}$) et subissent des transformations avant de déferler. Le déferlement des vagues en eau peu profonde près du mur se produit dans l’intervalle $0.021 < \frac{h_w}{L} < 0.034$. Les résultats sont présentés en fonction des pressions pariétales et des paramètres de la vague qui les ont générées, en plus des caractéristiques du jet qui s’en suit (voir le schéma de la Fig. 1.4 pour la définition des variables importantes). Les pressions pariétales et les données de jet critiques sont ici générées par des vagues dont la forme près du mur correspond à des déferlantes plongeantes ($\frac{H_{max}}{h_0} > 0.78$). Toutefois, d’autres formes de vague comme des déferlantes glissantes à proximité du mur pourraient également mener à des conditions critiques.

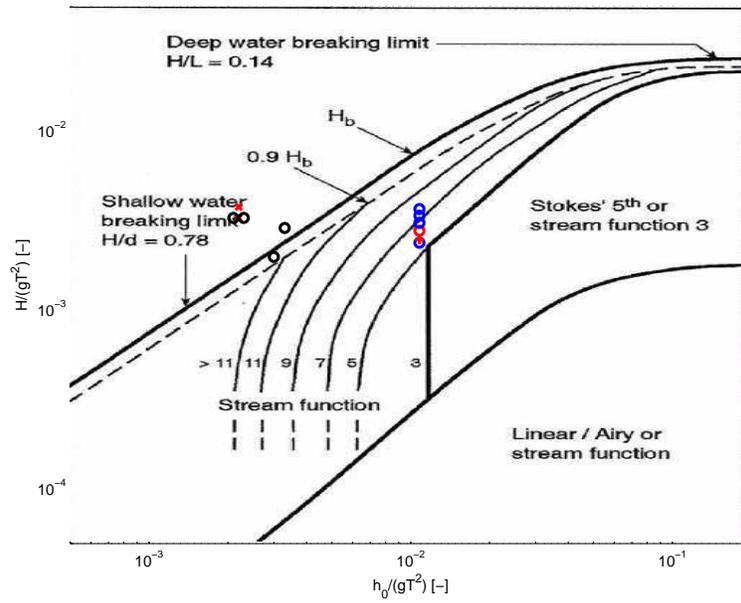


FIGURE 1.3: Graphique (charte) des vagues régulières. Basé sur les vagues incidentes ($H = H_0$) au pied de la plage : \circ & $+$, Impacts #6,7. \bullet , Impacts #12,8,9,13. Basé sur les vagues au mur ($H = H_b$; $h_0 = h_w$) : \times , Impacts #6,7; \circ , Impacts #12,8,9,13.



FIGURE 1.4: Définition des variables associées au déferlement de la vague et au jet près du mur.

À moins d'être explicitement mentionné, toutes les données en entrée et tous les résultats sont présentés à l'échelle du modèle. Le rapport d'échelle géométrique est de 1:4. Ainsi, la hauteur des vagues lors des tests du modèle, $H_0^m = 1$ m, est équivalente à l'échelle réelle à une hauteur de $H_0^p = 4$ m. Le lecteur est invité à porter attention aux variables utilisées dans le texte, à savoir de différencier la hauteur de la vague incidente, H_0 , et

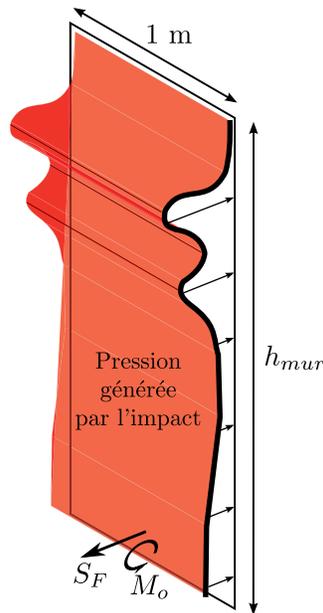


FIGURE 1.5: Définition des variables associées aux forces de réaction du mur. La surface rouge illustre la réaction du mur à la pression alors que S_F et M_o représentent la force et le moment associés à cette réaction.

la hauteur de la vague lors du déferlement, H_b . Le facteur d'échelle pour la période est de 2. Ainsi, une période crête de vagues lors des tests du modèle, $T^m = 6$ s, est équivalente à l'échelle réelle à une période de $T^p = 12$ s. Plusieurs variables ainsi que les facteurs d'échelle qui y sont associés sont notés au Tab. 1.1. Dans le canal, la mise à l'échelle suivant le nombre de Froude s'applique. Le nombre de Froude des tests associé à la surface libre au pied de la plage se situe entre $0.14 < Fr < 0.23$. Plus loin dans le rapport, nous présentons les forces de réaction maximales du mur (Tab. 4.4) à l'aide de la force horizontale perpendiculaire au mur par unité de largeur S_F et du moment de renversement, M_o , tous deux définis à la Fig. 1.5.

TABLE 1.1: Facteurs d'échelle entre le modèle et le prototype.

	Hauteur de vague	Profondeur	Période	Vitesse vague/jet	Hauteur du jet	Pression pariétale	Force de réaction horizontale (par mètre)	Moment de réaction (par mètre)
	H_0 [m]	h_0, h_w [m]	T [s]	u, V_R [m/s]	R [m]	P_w [Pa]	S_F [N/m]	M_o [Nm/m]
Modèle à prototype	4	4	2	2	4	4	16	64

Chapitre 2

Montage expérimental

Une vue d'ensemble du montage expérimental est présentée à la Fig. 2.2. Les vagues remontent une plage de pente 1:10. La plage possède à la surface une couche uniforme de 10 cm d'épaisseur constituée d'un mélange de galets, de gravier et de sable. Les matériaux de cette plage sont illustrés à la Fig. 2.1. Les détails de l'analyse granulométrique et du comportement de la plage peuvent être consultés dans Frandsen *et al.* (2015*b*). À l'échelle réelle, la taille du mur est anticipée à près de 10 m. Le rapport d'échelle géométrique du modèle est de 1:4. Le mur vertical situé à l'extrémité du canal de 122 m de long possède une surface d'essai de 1.2 m de large par 2.4 m de haut composée principalement d'une plaque d'aluminium renforcée. Pour couvrir toute la largeur du canal, des pans de mur renforcés faits en acier sont ajoutés dans les zones externes. Le mur est conçu de façon à se comporter comme une plaque rigide. Une paire d'accéléromètres est montée sur la plaque.

Les capteurs de pression sont distribués sur trois colonnes centrées sur le mur, comme illustré à la Fig. 2.3. Les pressions sur le mur sont principalement mesurées par des capteurs piézoélectrique PCB (27 capteurs espacés de 20 cm) pouvant mesurer des pressions jusqu'à 6.9 MPa et possédant une fréquence naturelle de 500 kHz. La fréquence d'échantillonnage utilisée était de 125 kHz. Deux caméras sous-marines sont utilisées dans une tentative pour capturer la forme de la vague lors du déferlement et établir ses caractéristiques. Ces caméras sont réglées pour enregistrer à 30 images par seconde à une résolution de 720x480. Il est à noter que ces caméras n'ont à l'origine pas été achetées pour ce genre d'expérience comportant des impacts. Bien qu'à une échelle différente, les recherches de Duncan et ses collègues ont montré qu'une résolution plus élevée est nécessaire (e.g., Kiger & Duncan (2012) ; Wang et al., 2014). Les amplitudes de la surface libre en amont du mur sont enregistrées à l'aide de capteur General Acoustics (Model : USS20130). La fréquence d'émission est ajustée à 200 kHz, la résolution de l'appareil est de 0.18 mm et une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz est utilisée. Un capteur de pression interstitielle RBR Solo est enfoui dans la plage au bas du mur. Il possède une étendue de mesure de 20/50 m (dbar) et une exactitude de ± 0.05 . Les accéléromètres (série AC-102) possède une plage de mesure dynamique de ± 50 g. Nous avons mesuré

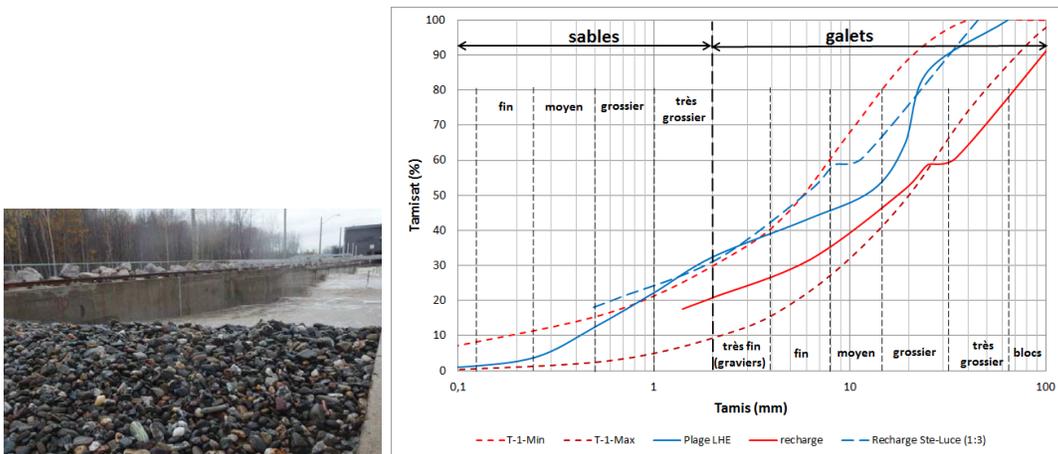


FIGURE 2.1: Matériaux de la plage (Frandsen *et al.*, 2015b). Granulométrie utilisée pour un exemple de plage (Ste-Luce, Québec) : — —, nouvel estimé théorique ; - - -, étendue estimée du prototype ; —, granulométrie utilisée sur le terrain ; — —, granulométrie utilisée dans le modèle.

des accélérations typiquement autour de 11 g, comme il est montré à l'exemple de la Fig. 2.4. La fréquence naturelle la plus basse est relativement élevée ce qui permet de supposer que le mur se comporte comme une plaque rigide. Dans un contexte de chargement de très courte durée, la plaque n'a pas le temps de réagir. Toutefois, il est important d'enregistrer les vibrations, car elles peuvent affecter la justesse des mesures de pression sur le mur.

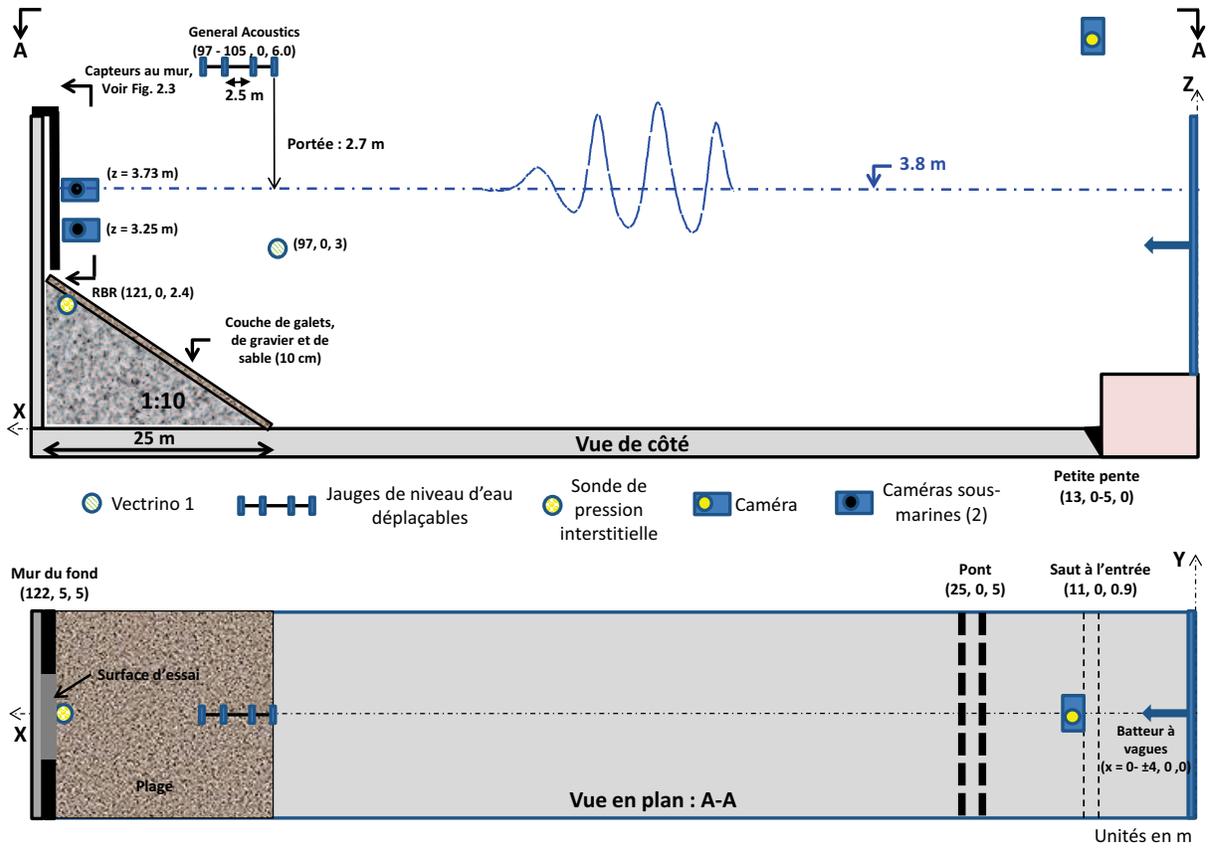


FIGURE 2.2: Montage expérimental.

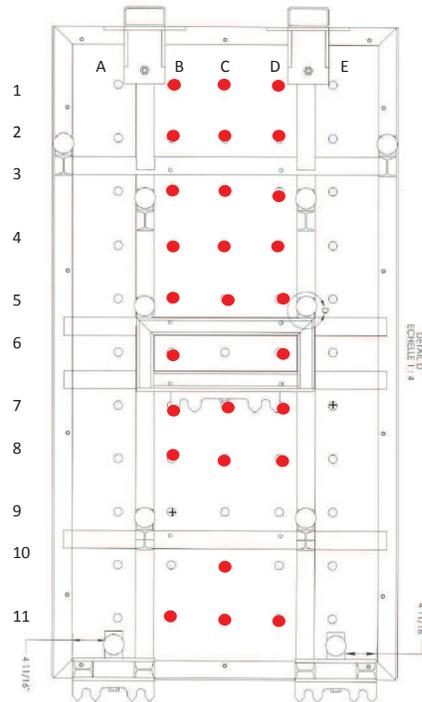


FIGURE 2.3: Disposition des capteurs sur le mur. ●, capteurs de pression PCB; +, accéléromètres.

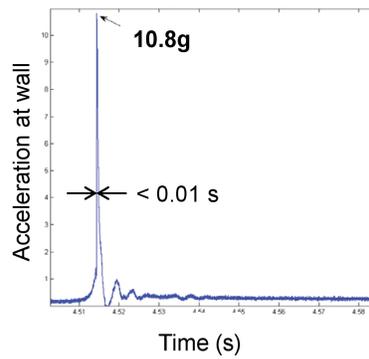


FIGURE 2.4: Exemple : pic d'accélération typique du mur.

Chapitre 3

Séries de tests

Dans ce qui suit, nous présentons quelques résultats clés basés sur des vagues incidentes régulières se propageant dans une profondeur d'eau de 3.8 m, de période constante de 6 s et ayant des hauteurs variables. Les conditions d'entrée consistent en un petit train de vagues de trois crêtes, comme le montre la Fig. 3.1. Ainsi, chaque série de tests produit un minimum de trois impacts sur le mur. Un total de 50 séries de tests (150 impacts) ont été effectuées. Ici, les six tests présentés sont caractérisés par une profondeur d'eau tout juste avant l'impact de $0.75 \text{ m} < h_w < 1.2 \text{ m}$ au pied du mur (au sommet de la pente de la plage) par rapport à une hauteur initiale (NME) de 1.2 m.

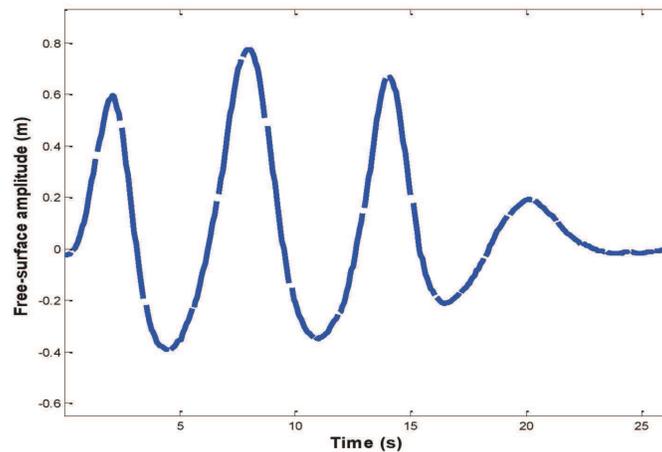


FIGURE 3.1: Conditions d'entrée typiques au pied de la plage. Amplitude de la surface libre.

La durée de chaque impact se compte en ms et ce indépendamment de la vague incidente ; qu'elle soit sans retournement, glissante ou plongeante, et indépendamment du type d'impact, que ce soit avec déferlement avant le mur, avec une poche d'air plus ou moins grosse (pour les déferlantes plongeantes), de type « flip-through », etc. De plus, le

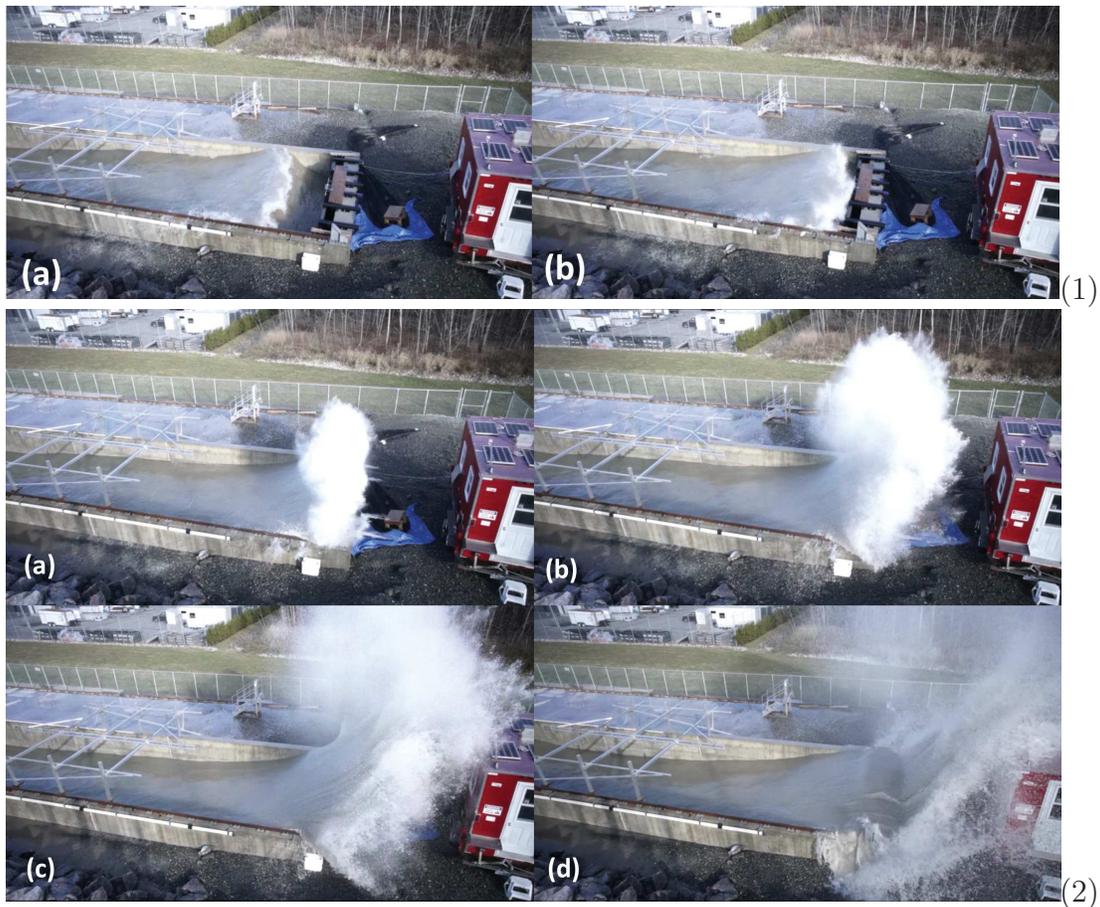


FIGURE 3.2: Exemple : (1) Déferlante glissante (« spilling breaker ») incidente ; (2) Impact d'un jet avec débordement.

débordement du jet et l'évacuation d'une partie de l'eau combinés à l'interaction entre le jet dévié, la vague réfléchie et la énième vague font du énième impact un sujet de recherche difficile et font de la conception d'un mur un réel défi, car la détection de ces très courts pics de surpression est très difficile dans de telles conditions. Un exemple d'impact suivant une déferlante glissante (« spilling breaker ») est présenté à la Fig. 3.2.

Chapitre 4

Discussion et résultats

Dans ce qui suit, un éventail de résultats provenant des 50 séries de tests (150 vagues) est mis en évidence. Nous avons mesuré une pression maximale au mur de 1.2 MPa, causée par une déferlante plongeante avec une poche d'air relativement grande (Impact #7). Cette vague avait une vitesse horizontale maximale de 8.3 m/s lors de l'impact, se produisant près du haut du mur (à 0.7 m du sommet du mur). L'ordre de grandeur de cette pression est plus petit que celui des pressions obtenues dans des expériences similaires menées par Hofland *et al.* (2010) dans le canal à grande échelle de Marknesse aux Pays-Bas et par (Bullock *et al.*, 2007) à Hanovre en Allemagne. Ceux-ci ont rapporté des pressions crêtes de l'ordre de 2.5-3.5 MPa, mais ces tests étaient effectués sur des surfaces de plage lisses et régulières. Bien que nous ne pouvons pas confirmer qu'une pression de 1.2 MPa représente le maximum qu'il est possible d'atteindre avec le mélange de gravier utilisé pour la plage (d'autres tests sont nécessaires), nous savons que ce mélange est conçu pour dissiper l'énergie dans un contexte de protection côtière et ainsi qu'on ne peut s'attendre à retrouver les mêmes pressions maximales que sur une plage lisses. Le Tab. 4.1 présente la liste des principaux paramètres et résultats en terme de pressions crêtes (maximales) sur le mur et de hauteur maximale de jet. Ces résultats sont issus de déferlantes plongeantes à proximité du mur. Il a été observé que des vagues ayant des hauteurs initiales similaires présentent en réalité une large étendue de valeurs en pression pariétale (changeant rapidement), car ces pressions dépendent de la hauteur de la déferlante, de la forme de la vague lors de l'impact au mur et de la position du déferlement. Une hauteur de jet maximale de 14.7 m et une vitesse correspondante de 35 m/s (Impact #6) ont été mesurées. Shiravani *et al.* (2014) ont trouvé pour leurs tests sur une plage lisse une vitesse de jet maximale de 40 m/s. Cependant, l'étude numérique préliminaire de Tremblay & Frandsen (2015) suggère que cette valeur pourrait être plus élevée. La comparaison entre les jets digités de trois impacts particulièrement représentatifs, parce qu'ils présentent la hauteur de vague incidente la plus élevée (impact #13), les pressions les plus élevées (impact #7) et les paramètres de jet maximaux (impact #6), est illustrée à travers les images de la Fig. 4.1.

Ici, nous présentons essentiellement les résultats des 2e et 3e impacts, car ceux-ci sont

TABLE 4.1: Résultats principaux de six impacts listés en ordre croissant de hauteur de vague initiale. À moins d’être mentionné, les pressions pariétales sont causées par l’eau. Note : l’impact #6 présente plusieurs pics de pression dans l’eau et l’air ou l’eau seulement (Fig. 4.4) et l’impact#7 présente un triple pic de pression dans l’eau très près de la pression dans l’air (Fig. 4.3).

Impact	Hauteur de vague initiale	Profondeur au mur	Vitesse horizontale de l’impact	Pression pariétale max. / position #	Hauteur max. du jet $t = 0.75$ s	Vitesse max. du jet $t = 0.75$ s
#	H_0 [m]	h_w [m]	V_H [m/s]	$P_{w,max}$ [kPa]	R_{max} [m]	$V_{R,max}$ [m/s]
12	0.85	1.18	-	126/D8	7.4	10
6	0.9	0.78	6.18	633/D3 616/D4 (air)	16.5	34
7	1	0.79	8.27	1277,899,992/D3 986/D6 (air)	11.5	20
8	1.1	1.06	6.86	570/D8	13.1	20
9	1.2	0.75	-	53/D8	6.5	7
13	1.3	0.81	5.05	126/D6	7	9.2

plus critiques que les 1er impacts en terme de pression maximale et de caractéristiques des puissants jets. La nature aléatoire de la physique des impacts démontre qu’en principe n’importe lequel des n impacts, où n représente le numéro de la vague, peut représenter un cas de référence en vue du design. Ainsi, de plus amples études devraient être réalisées. La Fig. 4.2 présente les pressions maximales et les paramètres de jet pour six cas particuliers provenant des différentes séries de tests. Les paramètres clés de ces six cas sont présentés au Tab. 4.2. Les caractéristiques les plus importantes qui ont été observées sont :

- Les paramètres critiques du jet en terme de hauteur et de vitesse ne sont pas nécessairement corrélés avec les pressions pariétales maximales ;
- La durée des grandes forces locales sur le mur et de l’évolution de l’écoulement aux abords de celui-ci est très courte, de l’ordre de 0.1 ms à 0.3 ms (e.g., Fig. 4.3c) ;
- Ce n’est pas nécessairement le premier impact qui causait la pression maximale sur le mur ou le jet le plus important. Lorsque une vague incidente rencontre une vague réfléchie, le niveau de l’eau au pied du mur tend à diminuer (un effet de succion se développe), ce qui peut, combiné à des déferlantes plongeantes avec beaucoup d’aération, engendrer des pressions maximales au niveau du mur comme l’illustre la Fig. 4.3). Le cas illustré présente en effet une grande poche d’air (0.11 m²) lors de l’impact (Fig. 4.3d). Il a été observé que la pression au niveau de l’eau et de l’air à l’intérieur de cette poche d’air est du même ordre de grandeur, comme le montre la Fig. 4.3c. Le temps de montée (d’augmentation) de la pression dans la

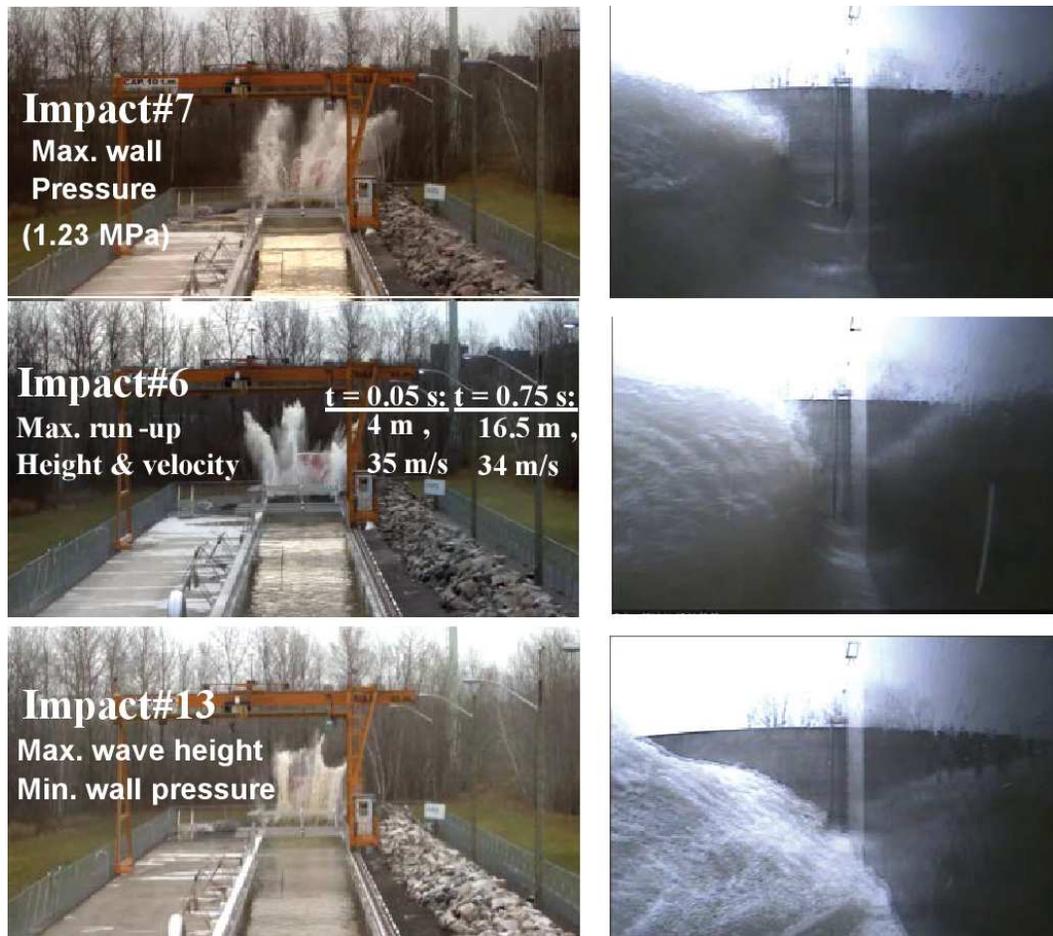


FIGURE 4.1: Impacts générant la pression maximale au mur (#7), la hauteur et la vitesse de jet les plus élevées (#6) et celui suivant la vague incidente la plus haute (#13). Sur la droite, des vues agrandies de la vague avant impact.

région de l'air est légèrement plus lent que celui dans l'eau parce que la poche d'air relativement grande doit être comprimée. Cet impact en particulier se produit dans la partie supérieure du mur (Fig. 4.3a). Cependant, immédiatement après, un impact à haute pression survient entre le niveau d'eau local et le NME (Fig. 4.3b). Cet aspect a aussi été constaté pour d'autres cas (e.g., as shown in Fig. 4.4). Puisque la distribution de pression varie rapidement et que le point de pression maximale peut se situer pratiquement n'importe où sur le mur, il n'est pas possible d'obtenir ou de fournir une équation unique décrivant cette distribution de pression (e.g., Fig. 4.3e, Fig. 4.4e) ;

- Le maximum de pression a tendance à se produire près ou au NME (au niveau du mur) ou quelque peu au-dessus (e.g. Fig. 4.3a,b et Fig. 4.4b). L'évolution à la fois temporelle et spatiale de la pression pour l'impact #6 est présentée à la Fig. 4.4(a) ;

TABLE 4.2: Caractéristiques des vagues incidentes avant impact. (*) Basé sur la « stream function theory ».

Impact	Profondeur de l'eau au mur	Hauteur de la vague incidente	Amplitude au pied de la plage	Cambrure de la vague (η/h_w)	Longueur d'onde	Au pied de la plage (h_0/L)	Au mur (h_w/L)	Hauteur au déferlement	Position du déferlement	Au pied de la plage	Au mur ϵ_w	Nombre d'Ursell
#	h_w [m]	H_0 [m]	η^* [m]	ϵ [-]	L^* [m]	μ [-]	μ [-]	H_b [m]	x_b [m]	H_0/L [-]	H_b/h_w [-]	$\frac{L^2 H_0}{h_0^3}$ [-]
12	1.18	0.85	0.52	0.44	34.73	0.109	0.034	1.02	2.05	0.025	0.86	18.7
6	0.78	0.90	0.55	0.71	34.84	0.109	0.022	1.18	1.07	0.026	1.51	19.9
7	0.79	1.00	0.63	0.80	35.06	0.108	0.023	1.34	0.78	0.029	1.70	22.4
8	1.06	1.10	0.70	0.66	35.21	0.108	0.030	0.70	0.62	0.031	0.66	24.8
9	0.75	1.20	0.78	1.04	35.39	0.107	0.021	1.15	2	0.034	1.53	27.4
13	0.81	1.30	0.86	1.06	35.61	0.107	0.023	1.16	> 2	0.037	1.43	30.0

- La forme de la déferlante plongeante (Figs. 4.3d) et la taille de la poche d'air jouent un rôle important dans les pressions et la physique du jet qui s'en suivent. Le cas générant le pic de pression maximal au mur présente une poche d'air relativement grande de près de 0.11 m². Une forme approximative de la vague basée sur les images prises par la caméra est illustrée. La vitesse horizontale maximale a été estimée, toujours à l'aide de ces images, à 8.3 m/s. Alors que l'impact #7 présente une poche d'air relativement grande lors de l'impact au mur, la plus haute vague incidente (impact #13) n'en a pas (Fig. 4.1) ;
- La déferlante plongeante de l'impact #6 qui a généré le jet le plus haut et le plus rapide n'a pas engendré les pics des pression les plus élevés. Cet essai représente un cas intéressant puisque plusieurs double pics de pression quasi simultanés se développent à l'impact accompagnés de deux petites poches d'air sous la crête de la vague (Fig. 4.4). La pression dans l'eau et dans l'air sont d'amplitudes similaires (663/616 kPa). Les temps de montée de la pression dans l'eau et l'air sont également similaires, car les poches d'air sont relativement petites. L'évolution du pic de pression présenté à la Fig. 4.4(c) illustre aussi que la pression d'air dans la poche est semblable à la pression dans l'eau. La répartition des capteurs de pression sur le mur était trop grossière (espacement trop large) pour obtenir une valeur précise de la pression générée par la seconde pointe de la vague (le capteur le plus près dans la colonne centrale est à la position C5). Il y a des raisons de croire que les deux pics de pression sont du même ordre de grandeur (530 kPa), car nous avons observé que les vitesses de front étaient identiques à ces deux positions (i.e. il est envisagé que la pression à $z = 4$ m est sous-estimée dans la distribution de pression de la Fig. 4.4(e)). La distribution de pression d'eau instantanée est présentée à la Fig. 4.4(b). De plus, rapidement après les deux premiers double impacts, un autre double pic de pression dans l'eau relativement important s'est produit à la hauteur du niveau d'eau local au mur ($z = 3.4$ m) ;
- Les deux distributions de pression instantanée des impacts #6 et #7 (Figs. 4.3a,b and Fig. 4.4b) montrent que la pression varie rapidement dans le temps et l'espace. Cela illustre une fois de plus la nature aléatoire de cette physique ;

- Le Tab. 4.3 met en évidence les caractéristiques de déferlement pour les deux impacts critiques (impacts #6,7). La hauteur des déferlantes par rapport à la profondeur et à la position du déferlement et la vitesse d'impact (V_H) vis-à-vis de la vitesse du jet y sont listés. Dans ces cas, les déferlantes plongeantes déferlent près du mur $\frac{x_b}{H_b} < 1$ à des profondeurs de $\frac{h_w}{h_0} < 1$. L'impact #6 avec le jet le plus haut présente un ratio de vitesse d'impact de $\frac{V_H}{V_R} < 0.2$. Les effets de compressibilité et la physique liée à l'explosion des deux petites poches d'air contribuent à l'énergie du jet. L'impact #7 présente un facteur de vitesse d'impact deux fois plus grand $\frac{V_H}{V_R} = 0.4$ et une unique grande poche d'air suivant un déferlement s'étant produit plus près du mur qu'à l'impact #6. Les quatre autres impacts (impacts #12, 8, 9, 12) sont reliés à des déferlements se produisant tôt $\frac{x_b}{H_b} >$ qui ne présentent pas d'entraînement d'air près du mur ;
- Le Tab. 4.4 présente les réactions au mur pour les deux impacts les plus critiques. L'impact #7 cause l'équivalent à l'échelle réelle d'un moment de réaction de 87 MN.m/m et d'une force de cisaillement au pied du mur et perpendiculaire à celui-ci de 15.4 MN/m. Cette force de cisaillement est près de 8 fois plus grande que celle identifiée à la suite des études en modèle réduit (1:10.3) réalisées dans un canal capable de générer des vagues jusqu'à 0.3 m d'amplitudes. Ces études sont décrites en détail par Poirier (2015) ;
- Une amplitude maximale de vague en entrée ne résultait pas en une pression pariétale maximale. Cela est peut-être dû au fait que la vague déferlait avant d'atteindre le mur. L'évolution de la pression montre un faible contenu en air (Fig. 4.5) ;
- La répétabilité des tests est difficile à obtenir parce que (1) le vent interagit avec les vagues et les impacts et (2) parce que le fond (la plage) se déforme.

Il a été observé que l'affouillement local au pied d'un mur lorsque très prononcé peut mener à la déstabilisation du mur. L'affouillement est causé par des déferlantes plongeantes qui déferlent près du mur et par la physique entourant le jet. Il est nécessaire d'investiguer davantage cette problématique pour quantifier la profondeur d'affouillement et par la suite développer des solutions de protection. La Fig. 4.7 présente un cliché de la plage au pied du mur et de l'affouillement qui s'y est développé au bout d'un peu plus de 150 tests d'impact. Sur l'image, le trou associé à l'affouillement est rempli d'eau et une berme s'est formée légèrement en amont. Le changement abrupt de la profondeur d'eau en avant du mur varie au fur et à mesure que l'affouillement se développe et nuit par le fait même à la répétabilité des expériences, car cela fait en sorte que les vagues déferlent et frappent le mur de façon différente pour une même hauteur initiale. Ainsi, en comparaison avec un fond lisse et régulier, une complexité accrue s'ajoute à cause de la déformation du fond et des effets locaux d'affouillement au pied du mur. Quelques détails sur le comportement du mélange de sable, de gravier et de galets utilisé dans la composition de la plage sont fournis dans (Frandsen *et al.*, 2015*b,a*).

TABLE 4.3: Classification des types de déferlement. Cas critiques - vagues déferlant au mur.

Impact	$\frac{h_w}{h_0}$ [-]	$\frac{H_b}{h_0}$ [-]	$\frac{V_H}{V_R}$ [-]	$\frac{x_b}{H_b}$ [-]
6	0.21	0.31	0.18	0.91
7	0.21	1.35	0.41	0.58

TABLE 4.4: Réactions au mur pour les deux impacts les plus critiques (valeurs du modèle et du prototype).

Impact	Force de réaction horizontale (par mètre) S_F^m [MN/m]	Moment de réaction (par mètre) M_o^m [MN.m/m]	Force de réaction horizontale (par mètre) S_F^p [MN/m]	Moment de réaction (par mètre) M_o^p [MN.m/m]
6	0.63	0.84	10.2	53.8
7	0.96	1.36	15.4	87.0

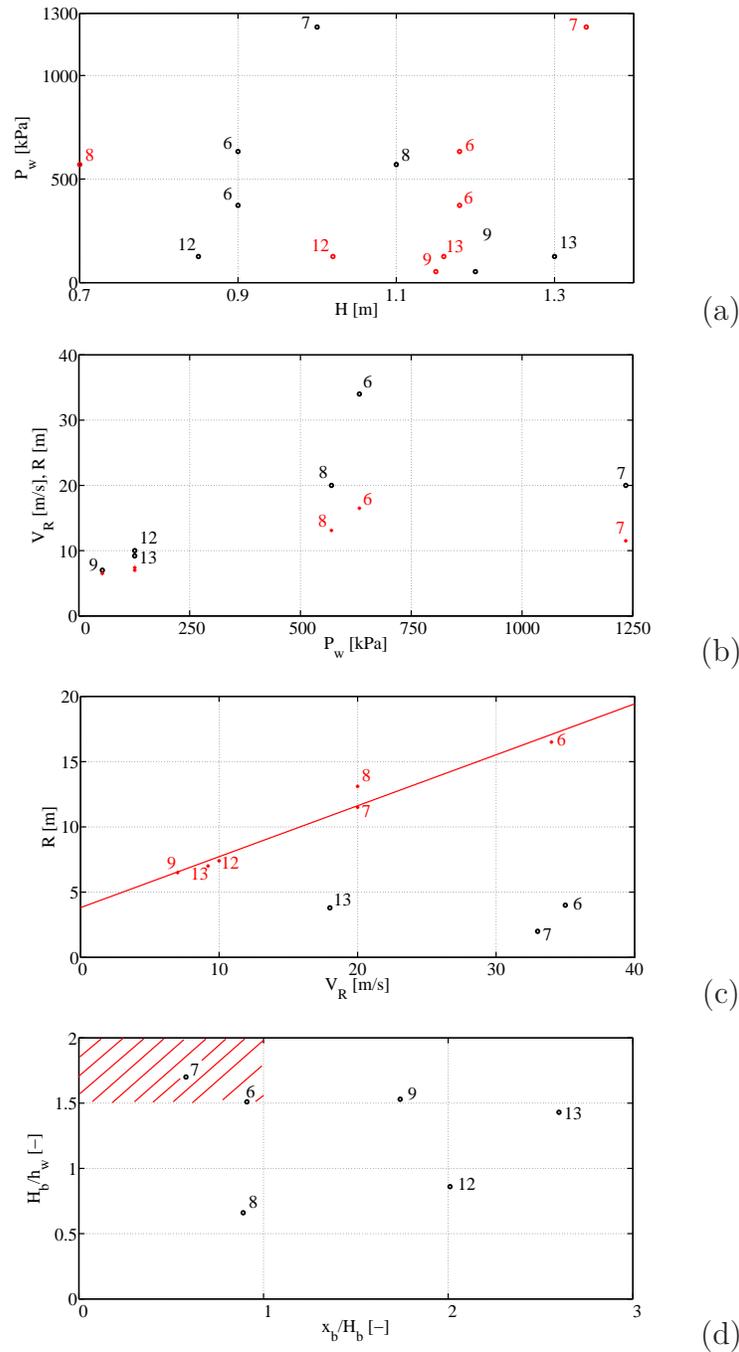


FIGURE 4.2: Corrélations entre les pics de pression pariétales et le jet (Test #). (a) Pressions pariétales maximales vs \bullet , hauteur de la vague incidente ($H = H_0$) et \circ , hauteur de la déferlante ($H = H_b$); (b) $+$, Hauteur du jet et \bullet , vitesse verticale au mur vs pressions pariétales maximales; (c) Hauteur du jet vs vitesse verticale le long du mur : \bullet , $t = 0.05$ s; $+$, $t = 0.75$ s; (d) Hauteur de la déferlante par rapport à la profondeur au mur vs distance du mur de la déferlante (///, critère d'impact critique trouvé : $h_w/h_0 < 1$, $x_b/H_b < 1$, $H_b/h_w > 1.5$).

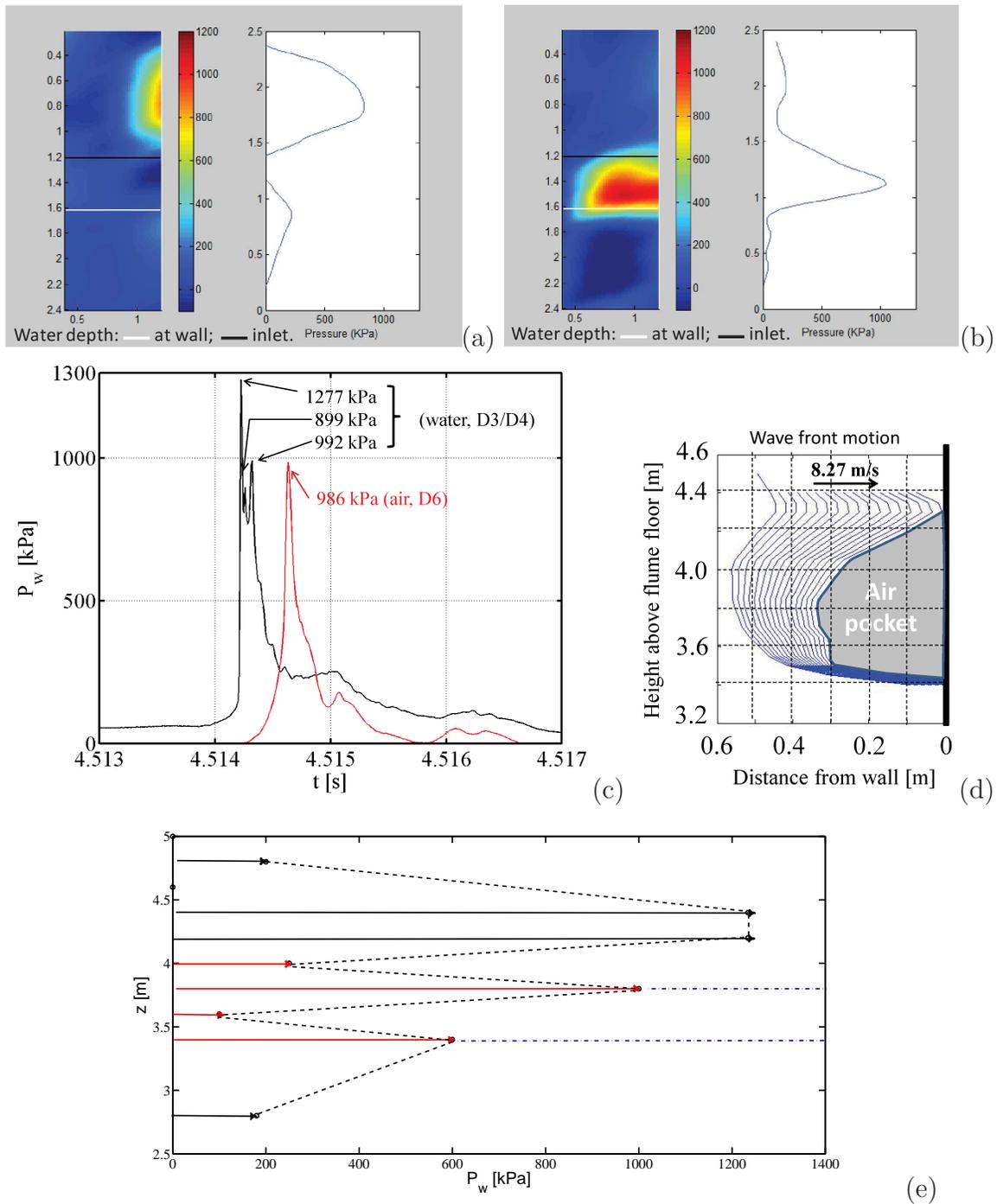


FIGURE 4.3: Impact #7 : pression pariétale maximale (aération élevée). (a, b) Distributions de pression sur le mur ; (c) évolution temporelle de la pression -, dans l'eau et -, dans l'air ; (d) mouvement du front de la vague avec l'entraînement d'une grande poche d'air ; (e) distribution de pression : -, eau ; -, air ; - · -, profondeur de l'eau au mur et à travers le canal.

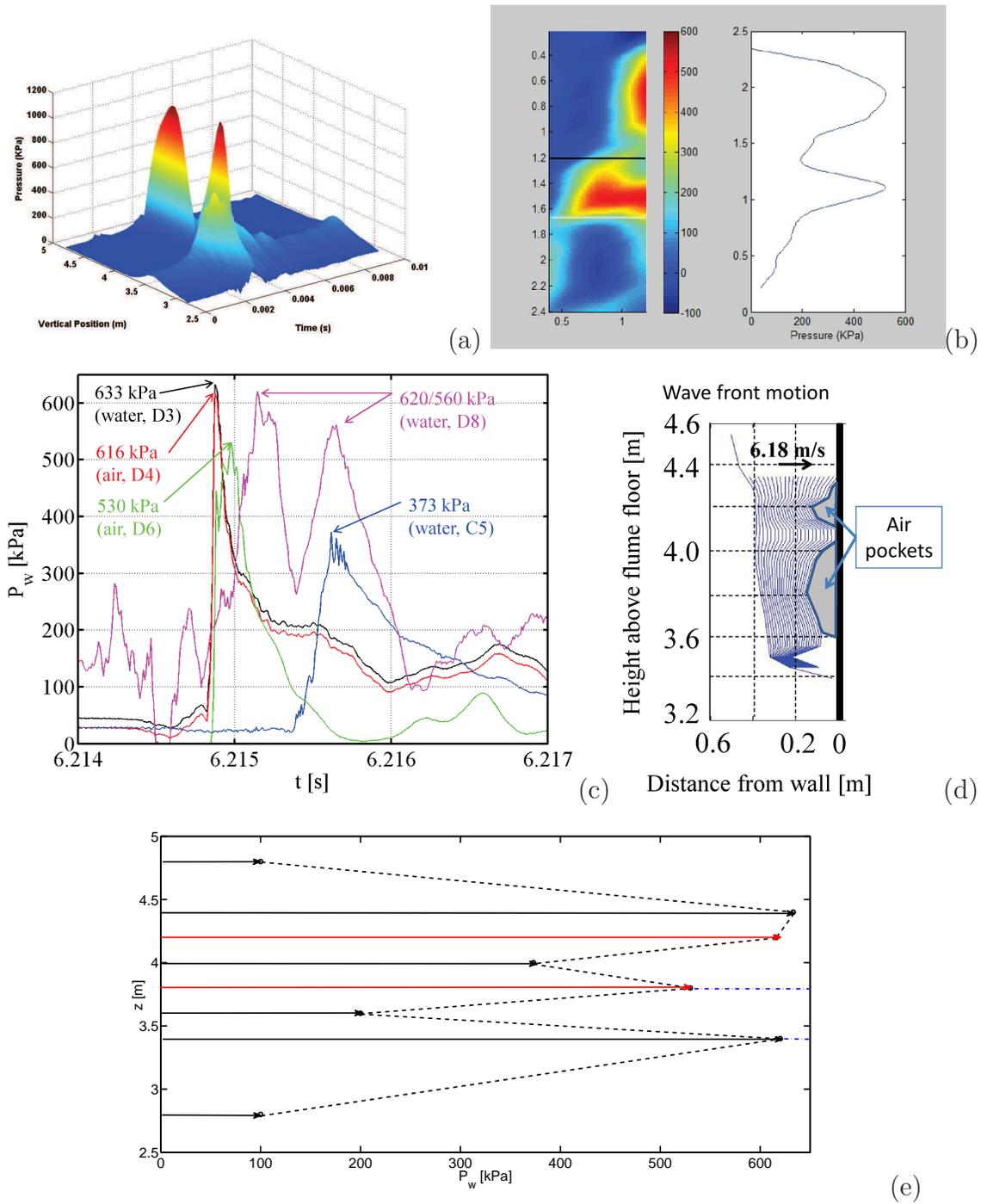


FIGURE 4.4: Impact #6 : cas avec double pic de pression et vitesse et hauteur de jet maximum. (a) Évolution temporelle et spatiale des pressions pariétales ; (b) distribution de pression pariétale ; (c) évolution temporelle de la pression -/ -/-, dans l'eau et -/ -/, dans l'air ; (d) mouvement du front de la vague avec l'entraînement des poches d'air ; (e) distribution de pression : -, eau ; - -, air ; - · - ·, profondeur de l'eau au mur et à travers le canal.

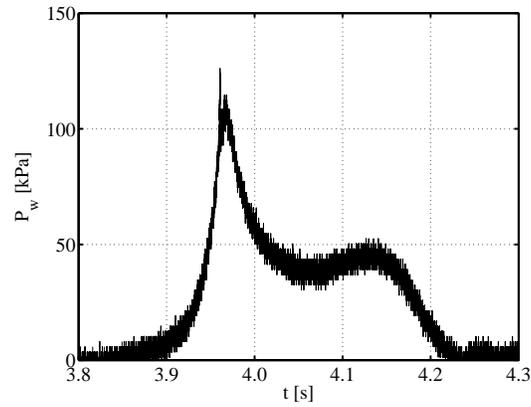


FIGURE 4.5: Impact #13 : évolution temporelle de la pression dans l'eau (faible aération).

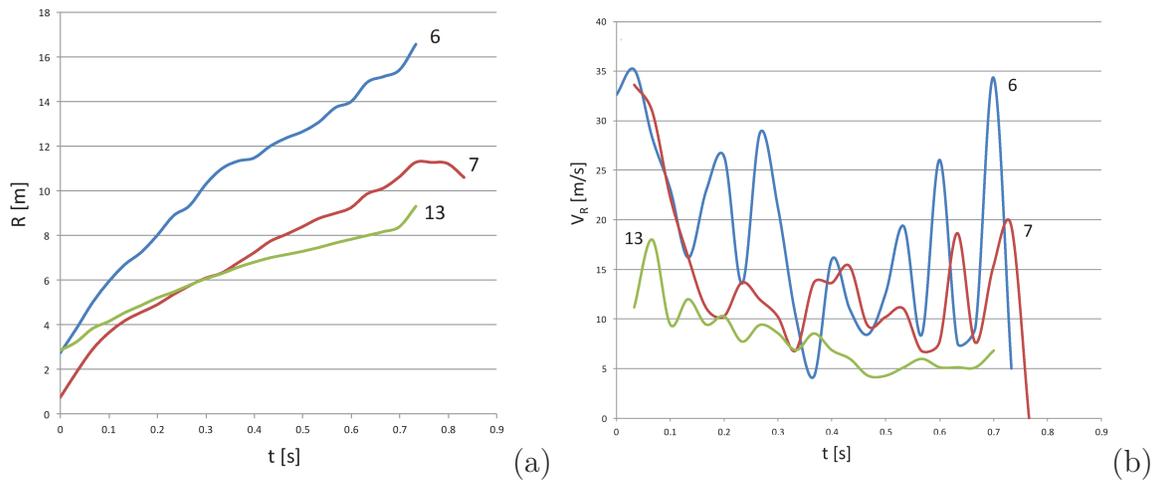


FIGURE 4.6: Impacts #6, 7, 13 : Évolution temporelle (a) de la hauteur du jet et (b) de sa vitesse.

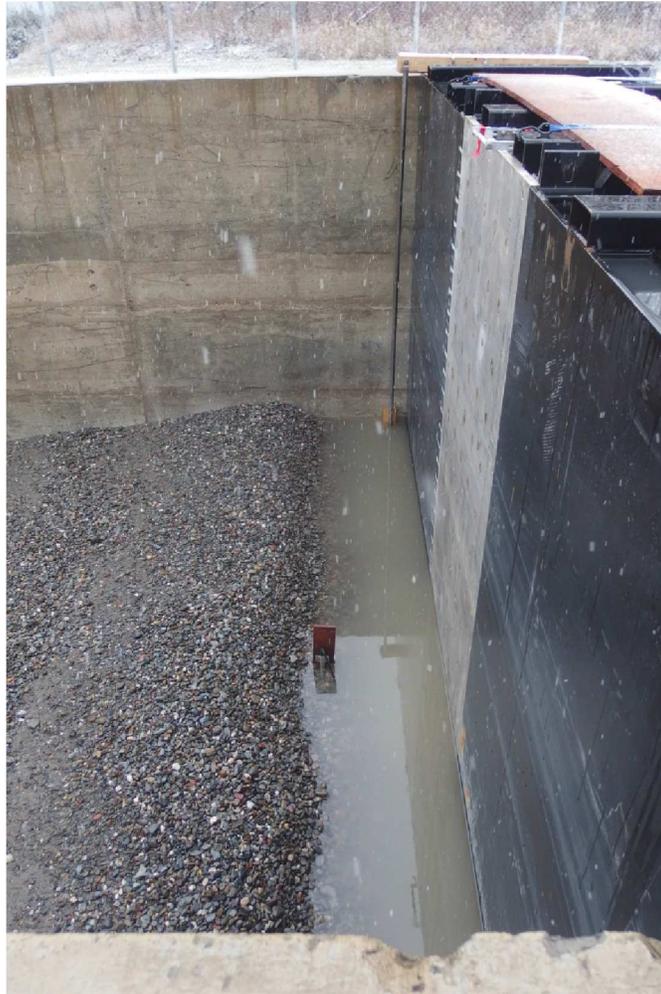


FIGURE 4.7: Affouillement local au pied du mur.

Chapitre 5

Résumé des observations et des résultats

La remontée des vagues sur une plage composée d'un mélange de sable, de gravier et de galets et le déferlement sur un mur vertical qui s'en suit ont été testés et étudiés. Le processus de déferlement engendre des distributions de pression aléatoires sur le mur. Des petits trains de vagues constitués de trois vagues régulières ($0.85 < H_0 < 1.3$ m où H_0 est la hauteur de la vague incidente au pied de la plage) ont été produits. Parmi les tests, deux cas d'impact critique ont été identifiés (impact #6, 7). Les résultats préliminaires sont :

- La pression maximale mesurée sur le mur est de 1.2 MPa, causée par une déferlante plongeante avec une poche d'air d'environ 0.11 m^2 . Une vitesse horizontale maximale de 8.3 m/s y étant associée a été identifiée.
- La pression crête et le processus de montée de l'eau (run-up) varie largement en fonction du type de jet ou d'explosion ;
- Les pressions pariétales dans l'air et dans l'eau peuvent avoir le même ordre de grandeur et peuvent se produire simultanément ou quasi simultanément dépendamment du volume d'air entraîné sous la vague. Les grandes poches d'air sont plus difficiles à comprimer que les petites, ralentissant ainsi le temps de montée du pic de pression.
- Un cas avec un double pic de pression simultané et deux poche d'air se comprimant sous une déferlante plongeante a engendré la vitesse verticale la plus élevée, soit 34 m/s. Toutefois, les pressions sur le mur n'étaient que de l'ordre de 0.6 MPa seulement.
- La vitesse du jet n'est pas proportionnelle à la hauteur de la vague incidente ou à la valeur de la pression maximale (e.g. 34 m/s pour 0.6 MPa ; 20 m/s pour 1.23 MPa).
- La position de l'amorce du déferlement, la forme de la vague lors de son arrivée au mur et l'entraînement d'air ont un effet important sur les forces d'impact et sur la physique du jet. Les cas critiques sont des déferlantes plongeantes déferlant près du mur $\frac{x_b}{H_b} < 1$ à des profondeurs de $\frac{h_w}{h_0} < 1$. L'impact #6 avec le jet le plus haut présente un ratio de vitesse d'impact de $\frac{V_H}{V_R} < 0.2$. Les effets de compressibilité et la physique reliée à l'explosion des deux petites poches d'air contribuent à l'énergie du

jet. L'impact #7 présente un facteur de vitesse d'impact deux fois plus grand $\frac{V_H}{V_R} = 0.4$ et une unique grande poche d'air suivant un déferlement s'étant produit plus près du mur qu'à l'impact #6.

- Ce n'est pas nécessairement le premier impact qui est le plus énergétique. N'importe lequel des 1er, 2e ou 3e impacts peuvent constituer l'impact maximal. Dans cette optique, la réflexions des vagues et la profondeur effective de l'eau au pied du mur sont déterminant.
- De sévères effets locaux d'affouillement sont observés au pied du mur. Une protection contre l'affouillement est nécessaire pour ce type de mur afin de garantir sa stabilité.
- Des déformations locales se forment aux endroits où la vague incidente rencontre la réflexion de la vague précédente.

Chapitre 6

Améliorations et recommandations pour des travaux futurs

Le travail présenté ici est considéré comme étant préliminaire. Quelques améliorations et idées de poursuite sont suggérées :

- Obtenir une répétabilité des tests ci-présents et suivre de plus près le développement des affouillements.
- Plus de tests avec une variété de conditions d'entrée de vague (des vagues focalisées par exemple) pour mieux identifier les forces maximales sur le mur, les caractéristiques des vagues, etc. ;
- Le débordement et le drainage de l'eau dans un contexte de stabilité du mur, de la pente et dans un contexte de protection des routes ;
- Les rôle de la réflexion des vagues et des jets déviés vers le large dans l'interaction avec les vagues suivantes ;
- La sensibilité à la surface et aux matériaux de la plage ainsi qu'à la variation de la pente ;
- L'étude des effets locaux d'affouillement dus au déferlement et au jet descendant le long du mur, tout comme l'étude des moyens de protection ;
- La forme des vagues et de l'air entraîné sous la déferlante est un paramètre important à mesurer ;
- Des tests avec une surface de plage lisse et régulière et différentes pentes ;
- Des tests avec des parapets (déflecteurs) pour identifier une forme optimale ;
- Des tests sur un mur en pente (ou incliné) et sur d'autres types de configuration.
- Des mesures de pression sur des murs réels (mesures de terrain).

Bibliographie

- ABRAHAMSEN, B. C. & FALTINSEN, O. M. 2011 The effect of air leakage and heat exchange on the decay of entrapped air pocket slamming oscillations. *Physics of Fluids* **23**, 102107.
- BAGNOLD, R. A. 1939 Interim report on wave-pressure research. *Journal of Institute of Civil Engineers* **12**, 201–226.
- BULLOCK, G. N., OBHRAI, C., PEREGRINE, D. H. & BREDMOSE, H. 2007 Violent breaking wave impacts. part 1 : Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coastal Engineering* **54**, 602–617.
- FRANSEN, J. B., XHARDÉ, R., BÉRUBÉ, F. & TREMBLAY, O. G. 2015*a* Large scale experimental storm impact on nourished beach using cobble-gravel-sand mix. In *34th Intl. Ocean, Offshore & Arctic Engrg., Paper no. 42201*. St. John's, Canada.
- FRANSEN, J. B., XHARDÉ, R., BÉRUBÉ, F. & TREMBLAY, O. G. 2015*b* Modélisation en canal d'un profil de plage en vue d'un rechargement de plage. Le ministère de la Sécurité publique, report no. CPS_13-14-02 (March). Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC, Canada.
- GUILCHER, P. M., JUS, Y., COUTY, N., BROSSET, L., SCOLAN, Y. M. & LE TOUZÉ, D. 2014 2D simulations of breaking wave impacts on a flat rigid wall. Part 1: influence of the wave shape. In *24th Intl. Ocean and Polar Engineering Conference*. Korea.
- HOFLAND, B., KAMINSKI, M. L. & WOLTERS, G. 2010 Large scale wave impacts on vertical wall. In *32th Intl. Conference on Coastal Engineering*. Shanghai, China.
- KIGER, K. T. & DUNCAN, J. H. 2012 Air-entrainment mechanisms in plunging jets and breaking waves. *Annual Review of Fluid Mechanics* **44**, 563–596.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. 1974 Breaking waves – in deep or shallow water. In *10th Conference on Naval Hydrodynamics, Hydrodynamics for safety fundamental hydrodynamics, ACR-204, ONR, Dept. of the Navy*, pp. 597–605. Cambridge, Massachusetts, USA.

- OUMERACI, H., KLAMMER, P. & PARTENSKY, H. W. 1993 Classification of breaking wave loads on vertical structures. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* **119**, 381–397.
- PEREGRINE, D. H. 2003 Water-wave impact on walls. *Annual Review of Fluid Mechanics* **35**, 23–43.
- POIRIER, C. 2015 Réfection d'un mur le long de la route 132. Report no. P-15728A (February). Le ministère des transports du Québec, Canada.
- SHIRAVANI, G., VOUSDOKAS, M., S., S. & STAGONAS, D. 2014 A methodology for measuring the velocity and thickness of wave-induced up-rushing jets on vertical seawalls and superstructure. In *34th Intl. Conference on Coastal Engineering*. Seoul, Korea.
- TREMBLAY, O. G. & FRANDBSEN, J. B. 2015 2D numerical viscous predictions of wave impact effects on an idealized seawall rooted in large scale experiments (1 :4). In *34th Intl. Ocean, Offshore & Arctic Engrg., Paper no. 42211*. St. John's, Canada.
- WANG, A., IKEDA, C. M., DRAZEN, D. A., FULLERTON, A. M., FU, T. & DUNCAN, J. H. 2014 The impact of a deep-water plunging breaker on a partially submerged cube. In *30th Symposium on Naval Hydrodynamics*. Hobart, Tasmania, Australia.

Annexe A

Données de pression sur le mur Description des données électroniques

Les données d'impact de six séries de tests ont été fournies. Le nom des dossiers représente le numéro de chaque impact. Il est à noter que les fichiers contiennent des données brutes, sans correction ou filtrage.

Données de pression sur le mur

1. Les données de chaque capteur de pression sont placées dans des fichiers Excel séparés suivant la notation illustrée à la Fig. 2.3 - identifiés par le no. d'impact, comme il est résumé au Tab. 4.1. Les noms des fichiers font référence à la position des capteurs sur le mur. Par exemple, le fichier « Impact_6_Pressure_B1.xlsx » contient les données de pression à l'impact #6 du capteur monté à la position B1.
2. Les valeurs de pression sont en kPa (colonne #1) et le temps est en seconde (colonne #2).
3. Les données de pression sont échantillonnées à 125 000 Hz.

Autres données

- Chaque dossier représentant un impact contient un sous-dossier : « Senseurs Canal ». Il contient les données des autres instruments.
- L'amplitude des vagues est mesurée par des capteurs acoustiques non intrusifs Massa et General Acoustics ainsi que par des jauges capacitives fixes installées le long du canal. Nous recommandons d'utiliser seulement les enregistrements au pied de la plage pour identifier les caractéristiques des vagues incidentes avant qu'elles ne remontent la plage. La surface libre près du mur était excessivement élevée, particulièrement lorsque les vagues incidentes rencontraient les vagues réfléchies par le mur.

- La pression interstitielle est mesurée à l'aide d'une sonde RBR. C'est un type de capteur qu'on enterre dans la plage (dans ce cas-ci, au bas du mur). Il est à noter que l'horloge de la sonde RBR n'est pas nécessairement synchronisée avec l'horloge des autres capteurs, demandant ainsi un soin particulier lors de l'analyse des résultats pour relier les différentes données de pression interstitielle avec les autres, d'autant plus que les impacts sont de très courte durée.
- Les fichiers Vectrino I contiennent des données de vitesse 3D mesurée dans le canal.