

Nouvelles recherches sur le déferlement des lames

New research on the breaking of waves

PAR J. LARRAS

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

Les nouvelles recherches ont porté sur les pressions des lames déferlantes le long d'obstacles en pentes douces (la question de la répartition des vitesses dans le corps des lames et celle de la répartition des pressions le long d'obstacles verticaux ayant déjà fait l'objet de recherches et de publications antérieures).

Ces recherches ont mis en évidence les mêmes phénomènes de « gifle » et « bourrage » sur une plage lisse entièrement nue que sur une muraille verticale, et montré qu'ils suivent pratiquement les mêmes lois.

Il ne semble donc pas qu'on puisse attribuer les surpressions fugitives de déferlement à des occlusions d'air entre la lame et l'obstacle, mais plutôt à des libérations internes d'énergie du même ordre que les ondes de choc.

The new research has been on the pressures caused by waves breaking along obstacles of mild slope (research on the velocity distribution in the waves and the distribution of pressure along vertical obstacles has already been published).

This research has indicated the same short and long term "shock pressures" ("gifle" and "bourrage") on a smooth entirely unobstructed beach as on a vertical wall and has shown that they follow practically the same laws.

It does not seem therefore that the fugitive overpressures of the breaking wave can be attributed to air trapped between the wave and the obstacle but rather to internal freeing of energy of the same order as shock waves.

Le déferlement des lames constitue l'un des phénomènes les plus dangereux, mais aussi les moins connus, qu'on puisse rencontrer dans la conception et dans la construction des ouvrages à la mer.

Nous en avons poursuivi l'étude pendant plusieurs années grâce aux gros moyens dont nous pouvions disposer dans le port d'Alger, et nous en avons fait l'objet à l'époque des deux articles suivants :

-- Le déferlement des lames sur les jetées verticales. (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1937.)

— Recherches expérimentales sur le déferlement des lames. (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1952.)

Mais nous avons été loin d'épuiser ce sujet difficile et notre successeur à la tête du port d'Alger, M. l'Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées BAUDELAIRE, a bien voulu s'imposer de ce fait la charge de poursuivre nos études plus avant, tout en nous permettant de continuer à les suivre étroitement.

La présente note a pour objet de rendre compte du résultat de la nouvelle série de recherches entreprises ainsi grâce à lui.

**

Les recherches ont essentiellement porté sur les pressions des lames déferlantes le long d'obstacles en pente douce (la question des vitesses dans le corps des lames et celle des pressions sur les obstacles verticaux ayant déjà fait l'objet de recherches et de publications antérieures).

Elles ont eu lieu au Laboratoire Central d'Hydraulique de France, avec le même générateur souple et dans le même canal vitré qu'au cours de nos essais précédents, la houle courant sur plus de 50 mètres par 0,60 m de profondeur avant de déferler sur une plage lisse à 7 % de pente (*).

Elles ont comporté par ailleurs la mesure, pour 4 périodes de houle et pour trois types de cambrure différents :

- Des affleurements inférieurs et supérieurs et des niveaux médians ou de repos de la houle, en divers points, au moyen de limnimètres à palpeur électrique;
- Des pressions instantanées de la houle sur le fond, en 10 points de la zone de déferlement ou de ses abords, au moyen d'un manomètre à noyau magnétique ne faisant pas saillie sur la plage, d'un détecteur de variations d'inductance, et d'un enregistreur cinématographique à oscillographe cathodique.

**

Nous avons trouvé en 1935-1936 que le « déferlement basculant » sur une muraille verticale en travers d'une plage se traduit par :

- 1° Une pointe de pression extrêmement brutale

(*) La rugosité de la plage correspondait à $1/c = 0,019$ unités MKS, pour un rayon hydraulique de 0,07 m, dans la formule de Tadini $U = C \sqrt{Ri}$ qui régit l'écoulement uniforme à surface libre sur le même fond.

et fugitive, d'origine élastique, que nous avons appelé la « gifle », tout au début du déferlement;

- 2° Une variation de pression moins brutale et plus continue, d'origine hydrodynamique, que nous avons appelée le « bourrage », pendant toute la suite du déferlement.

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1935 pour le « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue, à quelques différences près — qui n'ont pas d'importance fondamentale — dans l'allure générale des variations de la pression de « bourrage » en fonction du temps (voir fig. 1).

Nous avons trouvé en 1935-1936 que les pressions de « bourrage » du « déferlement basculant » sur une muraille verticale en travers d'une plage ne dépendent pas beaucoup de la position exacte de cette muraille dans la zone de déferlement.

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1953 pour les pressions de « bourrage » du « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue : les pressions de « bourrage » ne dépendent pas beaucoup de la position exacte de l'observateur dans la zone de déferlement, et l'on note tout au plus qu'elles semblent comporter un léger maximum à l'aplomb du point où la lame commence à bouillonner avant d'aller s'écraser plus loin.

**

Nous avons trouvé en 1935-1936 que la différence des pressions de « bourrage » extrêmes dans le cas du « déferlement basculant » sur une muraille verticale en travers d'une plage n'atteint pas la hauteur d'eau qui correspond à la dénivellation maxima des lames dans la zone de déferlement.

Ainsi pour les pressions de « bourrage » au niveau de repos sur une muraille verticale en travers d'une plage lisse à 5 % de pente :

VARIATION DE LA PRESSION DES LAMES DÉFERLANTES EN FONCTION DU TEMPS

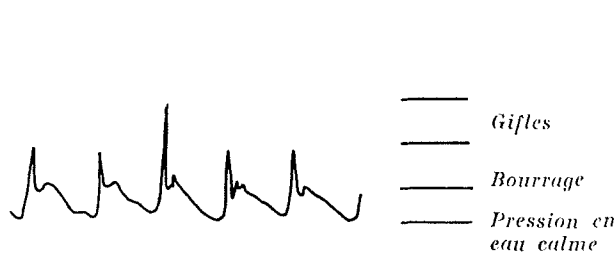


FIG. 1 a

Pressions au fond de l'eau sur une plage lisse entièrement nue à 7 % de pente

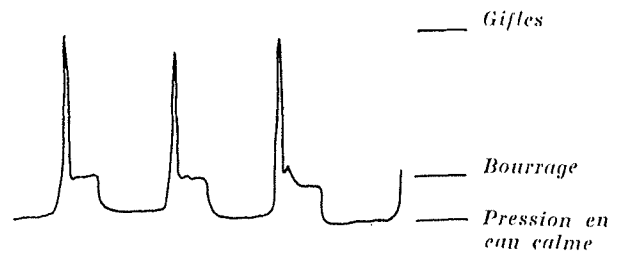


FIG. 1 b

Pressions au niveau de repos sur une muraille verticale barrant une plage lisse à 10 % de pente.

LAMES DÉFERLANTES				Rapport $\Delta p/\Delta h'$
Périodes $2T$	Dénivellations maxima $\Delta h'$	Profondeurs de déferlement*	Différences des pressions extrêmes Δp	
s	m	m	m	
0,95	0,20	0,12	0,08	0,40
1,10	0,27	0,16	0,10	0,37
1,20	0,235	0,16	0,115	0,49
1,35	0,155	0,14	0,11	0,71
1,55	0,23	0,105	0,11	0,48
				Moy : 0,49

De même pour les pressions de « bourrage » au niveau de repos sur une muraille verticale en travers d'une plage lisse à 7,5 % de pente :

LAMES DÉFERLANTES				Rapport $\Delta p/\Delta h'$
Périodes $2T$	Dénivellations maxima $\Delta h'$	Profondeurs de déferlement*	Différences des pressions extrêmes Δp	
s	m	m	m	
0,95	0,26	0,155	0,08	0,31
1,20	0,18	0,06	0,11	0,61
1,20	0,185	0,14	0,12	0,65
1,20	0,23	0,15	0,12	0,52
1,20	0,31	0,165	0,13	0,42
1,55	0,25	0,12	0,12	0,48

De même enfin pour les pressions de « bourrage » au niveau de repos sur une muraille verticale en travers d'une plage lisse à 10 % de pente :

LAMES DÉFERLANTES				Rapport $\Delta p/\Delta h'$
Périodes $2T$	Dénivellations maxima $\Delta h'$	Profondeurs de déferlement*	Différences des pressions extrêmes Δp	
s	m	m	m	
0,95	0,175	0,07	0,09	0,31
1,10	0,215	0,095	0,095	0,44
1,20	0,235	0,115	0,135	0,57
1,35	0,165	0,08	0,12	0,73
1,55	0,15	0,06	0,125	0,83
				Moy. : 0,61

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1953 pour les pressions de « bourrage » du « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue : la différence des pressions de « bourrage » extrêmes au fond de l'eau n'atteint pas la hauteur d'eau qui cor-

(*) On désigne ainsi la hauteur d'eau en période de calme au droit du point où la lame finit par basculer et par s'écraser.

respond à la dénivellation maxima des lames dans la zone de déferlement.

Ainsi pour la pente de 7 % :

LAMES DÉFERLANTES				Rapport $\Delta p/\Delta h'$
Période:	Dénivellations maxima $\Delta h'$	Profondeurs de déferlement*	Différences des pressions extrêmes Δp	
s	m	m	m	
1,2	0,048	0,046	0,0365	0,73
1,2	0,076	0,055	0,055	0,72
1,2	0,093	0,0725	0,063	0,70
2,0	0,098	0,0925	0,070	0,71
2,0	0,156	0,121	0,094	0,60
2,0	0,188	0,143	0,118	0,63
2,8	0,136	0,124	0,089	0,65
2,8	0,160	0,140	0,111	0,69
3,6	0,187	0,122	0,130	0,69

Les ordres de grandeur que nous avons constatés en 1935-1936 concordent d'ailleurs tout à fait avec ceux de 1953 puisque la différence des pressions de « bourrage » extrêmes tout au fond de l'eau est de l'ordre de $0,50 \times (3/2) = 0,75$ fois $\Delta h'$ au pied d'une muraille verticale pour une plage lisse à 7,5 % de pente, d'après la figure 8 de notre article des *Annales des Ponts et Chaussées* de 1937, alors que nous avons trouvé 0,68 fois $\Delta h'$ sans muraille verticale pour une plage lisse à 7 % de pente en 1953.

**

Nous avons trouvé en 1935-1936 que les dénivellations périodiques de l'eau près du point où la lame bascule et s'écrase sont répartis à raison d'environ $\frac{3}{4}$ au-dessus et d'environ $\frac{1}{4}$ au-dessous du niveau de repos.

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1953, non seulement pour les dénivellations périodiques de l'eau près du point où la lame bascule et s'écrase, mais pour les variations simultanées de la pression de « bourrage » sur le fond dans le cas d'une plage lisse entièrement nue.

La pression de « bourrage » maxima sur le fond est donc de l'ordre de :

$$+ (3/4) \times 0,68 \Delta h' = + 1,02 (\Delta h'/2),$$

c'est-à-dire du même ordre que la dénivellation maxima par rapport au niveau médian près du point où la lame bascule et s'écrase (*).

La pression de « bourrage » minima est, de son côté, de l'ordre de :

$$- (1/4) \times 0,68 \Delta h' = - 0,34 (\Delta h'/2).$$

(*) Le niveau médian se trouve aux environs de $\Delta h'/4$ au-dessus du niveau de repos

Et, comme on relève des pressions sensible-ment du même ordre dans le cas du déferlement sur une muraille verticale que dans le cas du déferlement sur une plage lisse entièrement nue, le « bourrage » du « déferlement basculant » ne présente, somme toute, pas plus de danger pour les ouvrages à la mer qu'un clapotis de même amplitude.

**

Nous avons trouvé en 1935-1936 qu'on ne relève de « gifles » appréciables sur une muraille verticale qu'au droit même du point où la lame bascule et s'écrase.

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1953 pour le « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue : l'on ne relève de « gifles » appréciables sur le

fond d'une plage lisse entièrement nue qu'au droit même du point où la lame bascule et s'écrase.

Les surpressions correspondantes varient donc beaucoup d'une lame à l'autre en un même point donné des murailles ou de la plage puisque la lame ne vient jamais s'écraser deux fois de suite au même endroit, ce qui modifie constamment le réglage extrêmement pointu de la courbe des pressions de la « gifle ».

**

Nous avons trouvé en 1935-1936 que la surpression maximum maximorum des « gifles » vagabondes vaut à peu près quatre fois la différence des pressions extrêmes du « bourrage » correspondant pour le « déferlement basculant » sur une muraille verticale en travers d'une plage :

LAMES DÉFERLANTES					Gifle Bourrage =
Pentes	Périodes	Dénivellations maxima	Bourrage	Gifle	
	mn	m	m	m	
7,5 %	0,95	0,26	0,08	0,30	3,75
7,5	1,20	0,18	0,11	0,44	4,0
7,5	1,20	0,185	0,12	0,46	3,85
10	0,95	0,175	0,09	0,375	4,2
10	1,10	0,215	0,095	0,46	4,85
10	1,20	0,235	0,135	0,50	3,7
10	1,35	0,165	0,12	0,50	4,15
10	1,55	0,15	0,125	0,48	3,85
					Moy. : 4,0

Nous avons retrouvé presque exactement la même chose en 1953 pour le « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue (*). Et, bien qu'il soit difficile d'aller très au-delà de cette simple indication que la pression de gifle

vaut de deux à cinq fois la pression de bourrage, nous avons cru possible de dégager de nos nouvelles recherches les ordres de grandeur un peu plus précis suivants :

LAMES DÉFERLANTES					Gifle Bourrage =
Pentes	Périodes	Dénivellations maxima	Bourrage	Gifle	
	mn	m	m	m	
7 %	1,2	0,048	0,0365	0,15	4,1
7	1,2	0,076	0,055	0,27	4,9
7	1,2	0,093	0,065	0,19(?)	2,9(?)
					Moy : 4,0

La « gifle » du « déferlement basculant » semble donc présenter quatre fois plus de danger que le « bourrage », ou qu'un clapotis de même amplitude, pour les ouvrages à la mer.

(*) Notons toutefois que nous n'avons pas eu les moyens de faire varier les pentes de plages de part et d'autre de 7 % dans les essais de 1953.

Il paraît être encore trop tôt pour pouvoir se rendre exactement compte des causes profondes et des lois générales du phénomène de la « gifle ».

Il ne semble en tout cas dès maintenant plus possible d'en assimiler la surpression fugitive au choc (probablement élastique) de la masse d'eau de la lame déferlante, ou d'une masse d'air fugi-

tivement occluse contre un obstacle qui devrait gêner cet épanouissement. Sinon l'on ne devrait pas relever de « gifles » au fond de l'eau dans le cas du « déferlement basculant » sur une plage lisse entièrement nue.

L'on doit donc regarder plutôt le phénomène de la « gifle » comme un phénomène interne du même ordre que les ondes de choc dont toute libération brusque d'énergie s'accompagne générale-

ment dans la nature, même en l'absence de tout obstacle.

Mais l'extrême difficulté d'une mesure certaine de la surpression maximum maximorum d'un phénomène aussi bref que vagabond que la « gifle » d'un « déferlement basculant » ne facilite certainement pas les choses aux chercheurs, et c'est pourquoi nous souhaiterions en voir augmenter très largement le nombre sur ce sujet délicat.

DISCUSSION

Président : M. WAHL

COMMENTAIRES DE M. MICHE :

M. MICHE signale d'abord que quelques-uns des faits indiqués dans la communication de M. LARRAS paraissent susceptibles d'une interprétation théorique. Par exemple :

- 1° Il ressort du calcul des houles limites, en profondeur finie, qu'au début du déferlement, le rapport entre la surélévation du niveau médian et la hauteur $\Delta h'$ est proche de 1/4 comme l'a trouvé expérimentalement M. LARRAS. Toutefois, le rapport théorique n'est pas strictement constant et passe de 0,20 à 0,30 environ, lorsque la longueur de la houle, rapportée à la profondeur de déferlement, augmente.
- 2° La répartition des pressions, mesurées dans le cas d'une houle déferlante en profondeur décroissante, correspond assez sensiblement aux résultats donnés par la théorie courante de la houle en profondeur constante. Ceci montrerait que cette théorie de première approximation, toute sommaire qu'elle soit, conserverait, à cet égard, sa validité dans ce cas limite et serait applicable, au moins à titre approché, au phénomène du « bourrage ».
- 3° Si l'on admet que les pressions beaucoup plus importantes de la « gifle » sont dues à un choc de la lame déferlante s'écrasant brutalement sur la plage et qu'il y a inversion des quantités de mouvement, c'est-à-dire choc élastique, on obtient effectivement des pressions comparables à celles enregistrées expérimentalement, et de l'ordre de 4 fois celles correspondant à la différence des pressions de bourrage.

M. MICHE considérant ensuite l'application des recherches de M. LARRAS au dimensionnement des ouvrages maritimes est conduit aux déductions suivantes :

La gifle, vu sa très courte durée et son aire localisée et fluctuante au cours du temps, n'apparaît pas comme un facteur déterminant pour les ouvrages dont les dimensions d'ensemble sont importantes vis-à-vis de l'amplitude de la houle. Elle justifie, néanmoins, l'adoption d'un certain coefficient de sécurité, à prendre en compte de toute façon pour de tels ouvrages et, en outre, l'emploi de matériaux résistant aux chocs répétés. Par contre, son influence relative doit croître au fur et à mesure que les dimensions de l'obstacle diminuent et ceci doit amener à majorer d'une façon plus importante les efforts statiques agissant sur l'ouvrage. On sait que, dans certains phares, par exemple, des pièces métalliques

de petite dimension ont été tordues sous l'effort considérable de la gifle.

En somme, il s'agit d'un phénomène qu'il y aurait intérêt à traiter sous l'angle statistique en vue de déterminer son importance relative en fonction des dimensions de l'obstacle rapportées à l'amplitude de la houle. Un coefficient de forme de l'obstacle doit sans doute intervenir également.

Enfin, par son action très brutale, la gifle semble être un agent important de désorganisation des rivages, même en matériaux compacts, et, par conséquent, doit être un des facteurs responsables des transports littoraux.

DISCUSSION :

M. BEAUDEVIN craint que le maximum maximorum de la gifle ne soit difficile à saisir au moyen d'une mesure manométrique portant sur une surface qui n'est pas négligeable.

M. MICHE répond que l'appareillage utilisé permet d'enregistrer des pressions d'une durée de 1/100 de seconde; il est possible que, pendant 1/10 000 de seconde, par exemple, la pression soit plus grande, mais pratiquement, ceci semble de peu d'importance.

En ce qui concerne les mesures faites en 1953, les pointes de pression, relevées dans les limites perceptibles, sont bien définies et apparemment fort précises. Des pressions encore plus importantes ont été relevées à Dieppe « Etudes sur les efforts dus aux lames », par MM. DE ROUVILLE, P. BESSON et P. PETRY, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1938-VII) mais cette fois-ci en cours de déferlement; elles ont été attribuées à l'expansion brusque de l'air occlus; toutefois ce sont des phénomènes très fugaces qui n'avaient pas le caractère semi-permanent des gifles.

Répondant à une question de M. LACOMBE, M. MICHE indique que les recherches de M. LARRAS permettraient le contrôle du critère de déferlement qu'il avait indiqué dans son étude de 1944 sur les Mouvements Ondulatoires de la Mer, mais qu'une vérification complète n'a pas été faite dans ce sens. Il rappelle que des études expérimentales effectuées il y a quelques années au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique sur la forme limite de l'onde solitaire et des ondes de longueur courante — études présentées au Comité Technique — avaient donné l'occasion de confronter, d'une manière satisfaisante, semble-t-il, les valeurs des cambrures des ondes limites mesurées avec celles données par le critère en question.

M. le Président remercie M. MICHE d'avoir présenté la communication de M. LARRAS et d'avoir donné des explications complémentaires.