

# Énergie mécanique de la houle : Utilisation

## Harnessing the mechanical energy of the waves

PAR M. GARIEL

PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL DES ÉTABLISSEMENTS NEYRPIG

Parmi les manifestations des énergies de la mer, celles de la houle apparaissent comme les plus spectaculaires et les plus tentatrices.

En fait, elles ont tenté beaucoup d'inventeurs, peu de véritables chercheurs.

Cela se traduit par le fait que trois rapports seulement nous ont été remis concernant l'utilisation de l'énergie de la houle et que, par ailleurs, nous ne connaissons pas de publication importante sur la question depuis les articles publiés il y a quelque trente ans dans la *Revue générale de l'Hydraulique* par le pionnier que fut sur ce point, comme sur d'autres, M. l'inspecteur général COYNE.

Ces rapports me paraissent cependant de nature à nous permettre de répondre aux ques-

tions fondamentales que l'on peut se poser sur ce sujet, depuis l'origine des énergies de la houle jusqu'à la rentabilité des installations éventuelles que pourrait comporter leur utilisation.

Je me propose donc, à la clarté des rapports qui m'ont été remis, d'examiner les questions suivantes :

- Origine, valeur et mode de transmission des énergies de la houle;
- Systèmes d'utilisation : possibilité d'aboutir à des ouvrages de rendements relativement élevés, mais dont la rentabilité paraît, pour le moment, tout à fait déficiente.

### I. — ORIGINE, MODE DE TRANSMISSION ET VALEUR DES ÉNERGIES DE LA HOULE

Pressée, frottée et fouettée par le vent sur des surfaces immenses, la mer apparaît comme une gigantesque machine éolienne, mais une éolienne assez spéciale qui se charge en somme de transformer directement les énergies du vent en énergie hydraulique.

Nous n'insisterons pas sur le mécanisme par lequel le vent exerce sa prise première sur la surface de la mer; nous ne parlerons pas des variations de niveau d'ensemble que peut provoquer la pression générale du vent sur telle ou telle portion de surface pour aborder uniquement le problème des ondes engendrées par le vent et qui constituent la houle, les vagues, les clapotis et toutes leurs variétés.

Bien entendu, les vagues peuvent dans des cas très particuliers être produites par tel ou tel

accident local : séismes, éboulements, explosions ou sillages de navires, mais, dans la presque totalité des cas, elles ont leur origine dans l'action du vent.

Cette action peut se décomposer en action de pressions normales à la surface de l'eau et en action d'entraînements tangentiels le long de cette même surface. Une analyse très poussée de ces deux variétés de causes a été présentée en 1954 devant la Faculté des Sciences de Grenoble par le capitaine Ira A. HUNT, du Corps of Engineers américain : « Transfert de l'énergie du vent à la houle ».

Quoiqu'il en soit de la valeur relative de ces causes, les effets se traduisent par des ondulations plus ou moins compliquées de la surface où l'énergie du vent se transforme en une triple

variété d'énergie hydraulique : énergies potentielles des différentes particules liquides qui se trouvent changées d'altitude par rapport au niveau initial d'équilibre; énergies cinétiques des mêmes particules dans les mouvements orbitaires dont elles sont animées; énergies capillaires dues aux allongements de la surface liquide sous l'effet des ondulations.

On peut faire le bilan de l'ensemble des énergies ainsi portées par les particules liquides, par exemple dans l'espace compris entre deux plans verticaux distants d'une longueur d'onde dans un phénomène ramené schématiquement à une onde sinusoïdale.

D'autre part, il faut considérer que ces énergies sont capables de fluier d'une ondulation à l'autre par des échanges perpétuels dans les deux sens, échanges dont on peut à chaque instant faire le bilan. On constate ainsi que ce bilan est en moyenne positif si l'on appelle positif le fait d'avoir une progression de l'énergie dans le sens même de la propagation de l'onde.

Ce déplacement de l'onde a lieu à une vitesse que l'on appelle généralement vitesse de phase ou célérité de l'onde.

Ainsi, dans le mouvement ondulatoire de la houle, il y a en moyenne débit d'énergie dans le sens du déplacement du profil des ondes et l'on peut montrer que ce débit d'énergie  $Q$  est donné par la formule suivante :

$$Q = \frac{A a^2 k m}{2} + \frac{\rho a^2 k V^2}{4 \operatorname{ch} mh} \left( 1 + \frac{2 mh}{\operatorname{sh} 2 mh} \right)$$

qui se réduit à :

$$\frac{\rho a^2 a}{2} \times \frac{V}{2} \left( 1 + \frac{2 mh}{\operatorname{sh} 2 mh} \right)$$

si on néglige les forces capillaires.

$A$  constante capillaire,

$a$  demi-amplitude de l'onde,

$k = 2\pi/T$  ( $T$  étant la période),

$m = 2\pi/L$  ( $L$  étant la longueur d'onde),

$\rho$  masse spécifique du fluide,

$h$  profondeur supposée constante,

$V$  célérité de l'onde.

Cette formule s'applique à une onde idéale. A quelles mesures pratiques faut-il se livrer dans la nature pour introduire dans la formule des résultats ne donnant pas lieu à de trop grandes erreurs?

Pour répondre à cette question, il faut considérer que la houle réelle est constituée par la superposition d'un certain nombre de houles composantes qui lui donnent la figure complexe qu'elle présente généralement.

Cette figure correspond à de véritables phénomènes de battements, si bien que l'on n'a plus affaire à une onde, mais à des trains d'ondes. L'enveloppe des crêtes des ondes du mouvement résultant se déplace elle-même à une vitesse qui est la vitesse de groupe et peut être très différente de la vitesse de propagation des ondes composantes. Il s'introduit donc là une notion assez complexe et qui a pu faire commettre des erreurs importantes dans l'appréciation des énergies transmises.

Mais en dehors de cette question théorique sur laquelle tout le monde est, je crois, à peu près d'accord, il se posait vers 1947 une question de statistiques de houles qui laissait à ce moment fort perplexe. En effet, la statistique dont on a besoin, en l'espèce, c'est le comptage une à une de toutes les vagues qui, dans l'année, doivent aborder le front de l'ouvrage et ceci avec toutes leurs caractéristiques : amplitude, longueur d'onde et, je dirai plus : nature. Nature car si cette vague est plus ou moins matinée de clapotis, ses propriétés énergétiques changent complètement de caractère jusqu'à perdre toute qualité de transmission possible.

C'est ici que se pose une des questions qui ont été agitées avant hier. Où faut-il placer les appareils enregistreurs de houle? L'idéal est à coup sûr de placer l'appareil en présence d'une plage aussi douce et aussi vaste que possible, mais en même temps assez loin d'elle au large.

C'est précisément ce qui est réalisé pour l'enregistreur de houle de Casablanca. Mais on n'a pas toujours à sa disposition une vaste plage à faible pente et il serait donc du plus haut intérêt de pouvoir apprécier et même mesurer l'importance des réflexions et leur influence sur la nature des vagues dont le houlographe mesure l'amplitude. Cette détermination devrait être faite au moment de l'installation de l'appareil. Mais, à ma connaissance, la méthode pour une telle détermination en mer n'existe pas encore, et je me permets de livrer cette question aux réflexions des chercheurs qui nous entourent.

Cela permettrait aussi de répondre à une autre question posée avant-hier. Si on construit un ouvrage en présence du houlographe, que deviennent les indications de celui-ci. Cela dépend à coup sûr de la distance de l'ouvrage à l'appareil et de son plus ou moins grand pouvoir réfléchissant. Tant qu'on n'a pas une méthode pour mesurer la part de clapotis imposée à la mer du fait de la présence de l'ouvrage, et si l'on peut raisonnablement craindre que cette part soit importante, le mieux sera de déménager le houlographe vers un site mieux approprié.

Quant aux enregistreurs eux-mêmes, il en existe dans lesquels les indications sont transmises à terre par un câble électrique, câble qui représente une dépense considérable

par rapport à l'appareil lui-même. C'est ainsi qu'est réalisée l'installation de Casablanca et elle fonctionne bien. Afin d'éviter la dépense du câble, il a été imaginé en France des appareils autonomes non reliés à la terre dont on peut peut-être dire qu'ils ne sont pas encore d'un usage courant, mais le seront certainement dans un avenir proche.

M. MAHÉ a décrit comment, à Casablanca, on interprète les diagrammes de houle relevés sur un manomètre enregistreur pour en tirer la fréquence moyenne probable des vagues dont l'amplitude est supérieure à une valeur donnée. Le tableau de ces fréquences est très instructif pour l'objet qui nous occupe. On peut y voir que la fréquence moyenne probable des vagues supérieures à 4 m d'amplitude est de l'ordre de 2 %, celle des vagues supérieures à 1,80 m de l'ordre de 10 %. Les périodes s'échelonnent pratiquement entre 8 et 16 s.

On se demande tout de suite à quel débit de kWh correspondent les amplitudes que nous venons de citer. Remarquons que la formule un

peu complexe indiquée ci-dessus, se simplifie si l'on considère la houle en profondeur infinie et que l'on aboutit finalement à la formule suivante donnant la puissance P en kW transmise par mètre de front d'onde d'une houle d'amplitude  $2a$  et de période T :

$$P = 0,95 (2a)^2 T$$

Pour :

$$2a = 4 \text{ m} \quad \text{on a : } P = 152 \text{ kW}$$

$$2a = 1,80 \text{ m} \quad \text{on a : } P = 31 \text{ kW}$$

ceci pour  $T = 10''$ .

En rapprochant cette dernière valeur de 31 kW par mètre de la fréquence des vagues d'une hauteur moyenne de 1,80 m, soit 10 %, on voit que, pendant près de 11 mois de l'année, on disposera de moins de 31 kW par mètre de rivage. Encore faut-il voir que ces 31 kW se répartissent de la manière la plus capricieuse le long de l'année.

## II. SYSTÈMES D'UTILISATION : POSSIBILITÉ D'ABOUTIR A DES OUVRAGES DE RENDEMENTS RELATIVEMENT ÉLEVÉS MAIS DONT LA RENTABILITÉ PARAÎT, POUR LE MOMENT, TOUT A FAIT DÉFICIENTE

Puis ce sont là des kW bruts. Comment les recueillir et quel sera le rendement de l'opération? Ce sont là les questions auxquelles vont nous permettre de répondre les trois rapports qui nous ont été soumis, ceux de MM. REMENIERAS et VALEMBOS suggérant des solutions, celui de M. DHAILLE étudiant la solution dièdres jusqu'au bout, c'est-à-dire avec courbes de rendement, sur modèles, projet en vraie grandeur et conclusions sur la rentabilité d'une telle opération.

Le rapport de M. DHAILLE indique que l'auteur a dépouillé d'abord quelque 600 brevets sur la question. J'ai refeuilleté ces brevets et constaté qu'ils comportaient 450 dispositifs à flotteurs assortis de dispositifs à panneaux, à pistons liquides et à plans inclinés.

Un seul avait retenu l'attention du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, c'est le brevet de dièdre pris en 1940 sur des idées de MM. GIANONI et GIRY avec réalisations à Sidi Ferruch et Pointe Pescade à proximité d'Alger.

L'idée d'offrir des dièdres à l'engouffrement d'une onde liquide avait été mise en avant en 1942 par M. REMENIERAS. Celui-ci avait imaginé, dans un canal d'irrigation, d'engendrer des ondes par le mouvement alternatif d'une vanne, puis de disposer perpendiculairement au canal un dièdre dans lequel l'onde émise augmentait

d'amplitude jusqu'à engendrer des niveaux notablement supérieurs au niveau moyen du canal. Une série d'expériences montra que les amplifications ainsi produites étaient de l'ordre de grandeur de celles prévues par le calcul. Mais il s'agissait là de calculs et d'expériences faits sans qu'il y ait production d'un débit liquide.

Cette idée peut se rattacher à l'utilisation de dièdres offerts non plus à des oscillations entretenues artificiellement dans un canal, mais aux oscillations naturelles de la houle.

A ces oscillations naturelles, M. VALEMBOS offre non plus un dièdre mais un résonateur constitué par un tuyau vertical plongé dans la mer et possédant donc une période propre d'oscillation que l'on peut, par des dispositifs mécaniques, amener à la résonance avec la période propre de la houle du moment.

Il y a là une idée de réalisation possible mais l'auteur n'indique ni résultats d'essais ni exécution d'avant-projets permettant de se rendre compte de la rentabilité des ouvrages.

Nous devons donc sur ces deux points nous en tenir au rapport de M. DHAILLE sur les dièdres à houle.

Avec ceux-ci l'ouvrage comporte « une série de dièdres d'assez grandes dimensions ouverts vers le large et terminés à leur partie arrière qui est très étroite par une ligne de clapets dé-

bouchant dans un bassin d'accumulation.... La houle qui s'engouffre dans les dièdres se transforme en un phénomène d'écoulement qui traverse les clapets et remplit le bassin, créant ainsi une chute d'eau artificielle ».

De très nombreux essais ont été faits à Grenoble pour analyser le comportement des dièdres lorsqu'on les soumet à des houles d'amplitude et de longueur d'onde variées se propageant dans des mers soumises elles-mêmes à des marées variées.

Du point de vue qualitatif, la propagation du phénomène dans le dièdre peut se présenter sous deux aspects : progression d'un phénomène ondulatoire d'amplitude croissante ou création d'un balancement général du niveau dans le dièdre analogue à une seiche. Or la frontière entre ces deux modes de comportement se trouve précisément à l'intérieur de la zone où l'on évolue par le jeu même des marées et par les caractéristiques pratiques de la houle.

On voit donc combien il y a lieu, en laboratoire, de surveiller les paramètres que l'on introduit dans le système et de multiplier les essais en faisant varier les uns et les autres.

En fait, environ 300 essais distincts ont été réalisés au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique entre 1944 et 1948.

Ils ont débuté dans de vastes modèles à trois dimensions sur lesquels sont apparus avec une acuité toute particulière les parasites dus aux réflexions sur le batteur. Comme il s'agissait d'essais très fins sur le rendement de l'énergie des vagues, et comme cette énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude, on conçoit combien grave se présente le jeu des parasites. Cependant un certain nombre de points pris plus ou moins à la volée firent apparaître des rendements de dièdre voisins de 50 %, valeur énorme par rapport à tout ce qui avait été obtenu antérieurement avec d'autres systèmes.

Mais en réalité les essais ne devinrent vraiment exhaustifs et péremptoirs qu'après l'invention par M. BIESEL du filtre à houle en 1947.

Ces essais firent ressortir non seulement le double phénomène indiqué ci-dessus mais permirent une analyse fine des rendements des dièdres en fonction des divers paramètres.

On arrive finalement ainsi à un ensemble de courbes représentant la variation du rendement en fonction de la longueur d'onde et de la profondeur et au très intéressant tableau que donne M. DHAILLE dans son rapport et qui offre vraiment une figure de la question :

	<i>Méditerranée</i>	<i>Atlantique</i>
Dimensions des dièdres :		
Longueur . . . . .	20 m	30 m
Ouverture . . . . .	6 m	8 à 9 m
Profondeur d'eau . . . . .	2 à 3 m	3 à 4 m
Clapet . . . . .	0,15 à 0,20 m	0,20 à 0,30 m
Rendement pour des houles de 2 m d'amplitude environ	35 %	20 à 25 %
Hauteur de refoulement . . . . .	4 m env.	5 à 6 m

Arrivés ainsi à un point où l'on se trouve en présence d'un ouvrage techniquement réalisable et ayant un rendement moyen convenable malgré l'extrême variété de ses conditions de fonctionnement, reste à examiner la rentabilité du système.

C'est ce que fait M. DHAILLE dans un dernier chapitre et qui se traduit par les valeurs suivantes : l'installation à Casablanca de dièdres munis de leurs bassins et de leur équipement hydro-électrique coûterait une dizaine de millions par mètre linéaire de rivage pour une production de kWh de l'ordre de 200.000 par an et par dièdre de 10 m de largeur. On arrive ainsi à 500 F le kWh/an installé ce qui, à l'heure actuelle, est évidemment prohibitif étant donné par ailleurs la qualité essentiellement aléatoire de l'énergie de la houle.

On voit donc qu'il apparaît assez vain de tenter actuellement de nouvelles recherches concernant des appareils à plus haut rendement, étant donné que même avec 100 % de rendements on serait encore bien loin de la rentabilité.

Nous avons montré que, au cours des essais, apparaissaient les deux modes de fonctionnement en seiche ou en onde progressivement renforcée. Or, au cours de ce dernier fonctionnement, il se produisait pour certaines combinaisons des paramètres le phénomène que l'on retrouve devant les jetées verticales et que l'on désigne par le nom pittoresque de « gifle », ce phénomène correspondant précisément aux maxima des courbes de rendement. On domestique donc ainsi ce phénomène si redoutable pour les murs verticaux et c'est du moins une satisfaction d'avoir vu apparaître, dans ce dièdre d'essai, l'énergie de la houle sous des aspects si divers.

## DISCUSSION

Dans la lecture de son rapport général, M. GARIEL insère la projection de quelques projets d'appareils d'utilisation de la houle, extraits des rapports particuliers. Les diagrammes de M. MAHÉ (Question 1), fournissant des données statistiques relatives à l'étude de la houle à Casablanca, sont également projetés à nouveau.

Puis, il passe la parole à M. DHAILLE pour le commentaire des projections extraites du rapport de celui-ci. Pour plus de commodité, ces commentaires ont été reportés en légendes sur les figures correspondantes du rapport de M. DHAILLE. On peut déduire notamment des figures 5, 6 et 7 du rapport de M. DHAILLE, que le rendement général moyen des dièdres est de 20 %. Mais l'étude montre que la rentabilité est loin d'être assurée. M. GARIEL conclut que l'utilisation de l'énergie de la houle ne peut être envisagée que dans des cas spéciaux, par exemple, dans une île qui, du point de vue militaire, exigerait une économie de combustible, ou bien encore pour l'alimentation de rivières ou de piscines...

M. GARIEL termine en rappelant que les maxima de rendement du dièdre correspondent au phénomène de la « gille », sur lequel il projette trois clichés :

- Le premier, très ancien, représente les essais faits à Dieppe sous la direction de M. de ROUVILLE, de M. PETRY et de M. BESSON (pression de 62 m obtenue avec des vagues de 3 ou 4 mètres).
- Le second et le troisième, relatifs à des essais faits au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, montrent respectivement l'effet de la gille maximum (pression passant de 6 m à 120 m avec une houle régulière) et un effet plus modeste, puisqu'avec une houle de 10 m on n'a obtenu que 25 m de pression.

Après cet exposé, vivement applaudi, M. le Président remercie M. GARIEL et ouvre la discussion.

M. COYNE rappelle qu'il y a trente ans, il a, sur l'invitation de M. de ROUVILLE, expérimenté à côté du phare du Minou, près de Brest, un bélier hydraulique destiné à recueillir l'énergie de la houle.

Les essais ont fait l'objet d'un compte-rendu détaillé dans la *Revue Générale de l'Hydraulique* de mars-avril et mai-juin 1939.

L'appareil commençait par un dièdre, continuait par un véritable entonnoir, avec au fond un clapet et la cloche à air du bélier hydraulique. Quelques événements au fond de l'entonnoir laissaient échapper une partie de l'air émulsionné.

Sans doute pourrait-on faire aujourd'hui beaucoup mieux, avec l'aide de modèles hydrauliques. Mais il ne semble pas à M. COYNE qu'on puisse remédier à l'extrême irrégularité de la houle, qui est variable comme on sait d'un jour à l'autre, mais aussi d'une vague à la suivante. L'énergie des lames était recueillie après déferlement. Lorsque le coup de mer était bien appliqué, on arrivait à recueillir une puissance instantanée de l'ordre de 1.000 ch, sous forme d'air comprimé (pendant un temps très court, une seconde environ).

Le bruit des événements dont était muni l'appareil s'entendait à plusieurs kilomètres à la ronde.

Mais les lames suivantes ne produisaient plus rien, soit qu'elles fussent plus faibles, soit qu'elles se présentaient mal devant l'embouchure. Le rendement moyen était infime, de l'ordre de 5 %.

La houle « de fonds », longue, était de beaucoup la plus efficace, même pour une amplitude faible.

L'appareil fut emporté, pour cause de défaut d'ancrage dans le rocher, par un coup de mer particulièrement bien appliqué.

M. REMENIERAS confirme que les essais qu'il a brièvement décrits avaient initialement, pour objet, de vérifier la validité d'une méthode graphique pour le calcul des écoulements non permanents dans les canaux, méthode alors en cours d'élaboration au laboratoire de la S.H.F. Cela explique leur aspect schématisé et le fait que les calculs aient été effectués pour les cas d'un débit nul à l'extrémité du dièdre. Au cours de ces expériences, on a été conduit à envisager l'utilisation de l'amplification d'une onde de translation parcourant un convergent, pour constituer un bélier hydraulique à ciel ouvert. Pour cet appareil, il a été effectué quelques essais correspondant au refoulement d'un certain débit à l'extrémité du dièdre; le rapport donne l'ordre de grandeur des résultats obtenus. Les applications du bélier aux pompes d'irrigation — et, éventuellement, au captage de la houle — ont paru trop peu rentables pour justifier une étude plus poussée de l'appareil.

En réponse à une question de M. REMENIERAS, M. DHAILLE confirme qu'il n'y a pas de sensible différence de rendement entre des dièdres à génératrices rectilignes, et des dièdres à génératrices ayant une forme proche de l'exponentielle.

M. LACOMBE est amené, sur la demande de M. le Président, à donner quelques informations sur la houle au large des côtes du Maroc (distance : 3 milles, profondeur : 40 m environ), au titre de la statistique des amplitudes. Il confirme que les houles d'amplitude 1,80 m sont rares, quoi qu'il puisse sembler.

Son expérience porte sur les mois de printemps et d'été (1953 et 1954) et il estime à une douzaine, sur 4 à 5 mois, le nombre de jours de houle importante dépassant 1,80 m. Quant à la période, elle est en général, à la belle saison, de 8 à 10 secondes. L'étude statistique des enregistrements effectués a été publiée le 15 mai 1953 (1).

A la demande de M. LACOMBE, M. GELCI précise que les périodes significatives mesurées sur les enregistrements de la houle à la Station d'Océanographie physique d'Aïn Diab (Casablanca) varient, en moyenne, de 8 à 16 secondes.

On observe, cependant, quelquefois, des houles plus longues (jusqu'à 21 s). L'analyseur harmonique de la station permet de mettre en évidence des composantes plus longues encore (jusqu'à 30 s), mais de très faible amplitude. Le rivage est orienté vers le nord-ouest, c'est-à-dire que le houlographe reçoit à peu près normalement la houle. La pente est assez douce, à 1,600 km, la profondeur est environ 18 m.

M. CARTWRIGHT fournit des renseignements sur la houle près des côtes anglaises. Il ne peut donner des chiffres exacts, mais indique l'ouvrage que l'on peut consulter (2). Il lui semble que les périodes moyennes sont à peu près les mêmes que celles indiquées par

(1) *Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Etude des côtes de la Marine*, volume V, 1953, n° 8, pp. 345-349.

(2) Houle enregistrée pendant l'année 1953 dans l'Atlantique Nord. (*Nature*, London, volume 174, p. 827, 1954.)

M. MAHÉ, quoique les amplitudes semblent un peu plus grandes. Cette différence pourrait être expliquée par le changement de lieu. Il peut confirmer, par expérience personnelle que, dans l'Atlantique Nord, cette « houle de fond », signalée par M. COYNE, est presque toujours présente et avec une période moyenne de 12 à 18 s; elle a souvent une très petite amplitude au large, mais elle représente une propagation d'énergie assez grande, à cause de la vitesse de groupe, ce qui pourrait être utile pour faire fonctionner des générateurs.

M. GELCI reprend la parole, afin de préciser qu'une statistique effectuée par M. R. SIMONET et M. O. TANGUY à partir d'observations visuelles, montre que les périodes s'échelonnent entre 8 et 16 secondes l'hiver et 7 à 14 secondes l'été.

Ces répartitions sont quasi identiques à celle de Capelinhos et Horta aux Açores, ce qui infirmerait l'augmentation de la période de la houle au cours de sa propagation.

M. VALEMBOIS signale qu'on a mesuré à Bayonne, pendant quelques heures, une houle dont la période était supérieure à 17-18 s, avec des creux de 5,50 m à 6,50 m, cela à 1 mille en mer, très largement sur les côtés de la barre. Le creux indiqué est le creux maximum observé sur une période de 20 minutes.

M. le Président intervient pour faire remarquer que lorsqu'il y a une houle bien établie, une houle forte, il y a certainement un phénomène de grosse lame qui se reproduit à des intervalles, variables d'ailleurs, généralement en nombre impair. Il n'y a pas une très grande différence entre le creux de ces lames et le creux des autres; elles les dépassent peut-être de 40 %.

M. le Président suggère à M. DHAILLE un rapprochement à faire entre les formules qu'il donne sur l'énergie de la houle et celles déjà données sur l'attaque des talus de digue.

A ce propos, M. COYNE prend la parole pour indiquer que la houle bretonne atteint 7 mètres de creux au large, par gros temps. En certains points comme Ouessant, où le fond remonte très rapidement, la crête déferlante atteint jusqu'à 20 m.

C'est ce déferlement, accru par une roche située à 30 m devant lui, qui a rompu le phare de la Jument. L'installation d'un sismographe a permis d'observer la grande irrégularité des coups de la lame : deux seulement, dans une nuit, provoquèrent des elongations dangereuses de 6 ou 7 cm, en tête de la lanterne, et les autres pas plus d'un centimètre.

M. le Président précise que les ébranlements les plus fréquents enregistrés sur des phares au cours d'une tempête sont de l'ordre de 4 ou 5 mm, avec quelques rares maxima de 6 ou 7 cm, ce qui est énorme dans une tour en maçonnerie raide ou en béton armé.

M. GARIEL rappelle que les revêtements des ouvrages en blocs absorbants réduisent les effets nuisibles de la houle, ainsi qu'on peut le constater à Saint-Guénolé, en comparant la hauteur des vagues sur la partie revêtue et la partie lisse de la digue.

M. DHAILLE, revenant au sujet de la Question V, conclut de cet échange de vues sur l'irrégularité de la houle, que la récupération de l'énergie débitée dans ce phénomène nécessite la mise en œuvre de dispositifs de grandes dimensions pour disposer d'une puissance convenable et extrêmement solides pour résister aux tempêtes. Finalement l'énergie récupérée reste en moyenne faible et le rendement économique du système ne paraît pas pouvoir être assuré.

M. COYNE ajoute que les rendements pourraient être accrus en choisissant, pour capter la houle, des points singuliers où se produit déjà une certaine concentration naturelle de son énergie.

La séance est levée à 17 h 50.

## LES ÉNERGIES DE LA MER

Compte rendu intégral des QUATRIÈMES JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE.  
de la Société Hydrotechnique de France

DEUX VOLUMES, brochés..... 8 000 F