Énergie mécanique de la houle : Essais sur modèles

Mechanical energy of waves : Scale model tests

PAR M. GRIDEL

DIRECTEUR-ADJOINT DES ÉTUDES ET RECHERCHES A ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
DIRECTEUR DU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE DE CHATOU

La réalisation sur modèles réduits d'essais faisant intervenir les phénomènes de houle n'est entrée dans la pratique usuelle des Laboratoires d'Hydraulique que depuis relativement peu de temps (guère plus de 25 ans) et l'on peut s'en étonner puisque les études en maquettes de carènes de navires, qui bénéficient d'une tradition beaucoup plus ancienne, ont toujours eu fondamentalement à connaître des vagues d'accompagnement des navires, phénomène étroitement apparenté à la propagation de la houle naturelle.

Quoi qu'il en soit, si les précurseurs dans la matière qui nous intéresse ici semblent avoir été pour l'Europe les Laboratoires de Delft, Grenoble et Lausanne — et les recherches bibliographiques n'ont pas permis de constater qu'en cette matière le Nouveau monde ait précédé l'Ancien — il est néanmoins de stricte justice de signaler l'intérêt que les ingénieurs français de travaux maritimes ont porté dès l'origine, c'est-à-dire il y a un quart de siècle environ, à ce type de recherches sous l'impulsion de P.-H. Watier, directeur des Ports Maritimes et Voies Navigables au Ministère des Travaux Publics, dont l'esprit réaliste avait immédiatement pressenti tout ce que l'expérimentation en Laboratoire pouvait apporter à la difficile technique de la conception et de l'étude des ouvrages portuaires.

Fort heureusement depuis quelques années, l'ère des pionniers a fait place à celle de la recherche systématique, et le nombre des communications relatives à cette technique, annoncées au Secrétariat de la Société Hydrotechnique de France à l'occasion des 4^{es} Journées de l'Hydraulique — onze — sur différents aspects de ce problème, montre combien l'étude sur modèles des phénomènes en relation avec la houle est

maintenant entrée dans les mœurs des ingénieurs de travaux maritimes.

Sur les onze communications annoncées, deux n'étaient pas parvenues à temps à votre rapporteur pour qu'il puisse en rendre compte dans la notice imprimée qui devait vous être adressée quelques jours avant l'ouverture de ces travaux.

Il s'agissait d'un mémoire de M. le Professeur THIJSSÉ de Delft et d'une communication de M. le Professeur BONNARD de Lausanne.

Le Professeur THIJSSÉ, qui anime l'équipe du laboratoire de Delft, toujours à la pointe des recherches en matière d'ouvrages maritimes, nous avait laissé espérer l'automne dernier, lors du congrès à La Haye de l'Association Internationale de Recherche Hydraulique, qu'il pourrait apporter à nos réunions de Paris les premiers résultats d'une étude qu'il entreprenait sur la génération en laboratoire, sur un modèle de port, de houles locales provoquées par le vent se combinant avec des houles d'origines lointaines, les premières étant créées sur la maquette par des mouvements d'air engendrés au moyen de ventilateurs, tandis que les secondes étaient produites par un générateur à volet d'un type classique.

Nous venons d'être prévenus que le déroulement des expériences ne justifie pas aux yeux de son auteur une communication publique qu'il juge encore prématurée, et ne pouvons que nous incliner devant des scrupules qui honorent hautement sa probité scientifique tout en regrettant de ne pouvoir bénéficier ici de la primeur des résultats de ces essais faisant appel à une technique nouvelle.

Fort heureusement, M. le Professeur BONNARD, qui depuis 26 ans expérimente sur la houle en liaison avec M. STUCKI, a bien voulu, malgré

des circonstances contraires, prendre la peine de compléter à notre intention une publication sur les études du port ture de Samsoun destinée au *Bulletin Technique de la Suisse Romande* par un trop court exposé sur les méthodes générales mises en œuvre dans son laboratoire pour engendrer la houle expérimentale et en mesurer les effets.

Il décrit en particulier un générateur pneumatique de son invention qui depuis longtemps anime ses modèles, toute une gamme d'appareils et de méthodes pour la mesure directe ou indirecte des niveaux (cette dernière réalisée au moyen de capteurs de pression par variation de la self induction de bobinages), et un procédé de mesure des efforts sur les ouvrages provoqués par le déferlement de la houle.

S'il est permis à l'occasion de cet important exposé de retenir une leçon, pour nous tous, expérimentateurs en laboratoire de travaux maritimes, ce sera, si vous le voulez bien, cette idée que les modèles doivent, pour être sûrs, ne pas être réalisés avec des échelles trop petites : dans des bassins dont la superficie se compte par centaines de mètres carrés et la profondeur par un nombre appréciable de décimètres, dans des canaux d'expériences longs, larges et pro-

fonds, on a obtenu à Lausanne des résultats qui n'ont jamais déçu les maîtres d'œuvre.

Si l'adoption de telles échelles a pour rançon en général — mais cela n'est pas toujours le cas — un accroissement des dépenses d'essais, il n'en reste pas moins que ces frais marginaux sont peu de chose au regard du coût des ouvrages réels et de leur garantie de stabilité.

Pour ce qui est des neuf autres rapports, qui nous sont parvenus dans les délais prescrits, on peut les partager en quatre groupes distincts :

- Ceux concernant la houle proprement dite, sa mesure et les considérations sur la similitude à laquelle elle conduit. Ce sont les communications de MM. les Professeurs KRAVTCHEKO, SANTON, MARCOU et de M. VALEMBOS;
- Ceux intéressant l'action de la houle sur les ouvrages : MM. SCHAEER et LE MÉHAUTÉ;
- Celui relatif à l'influence de la houle sur le fonctionnement des turbo-générateurs d'usines marémotrices : MM. DUPORT et ROBERT;
- Ceux concernant l'action de la houle sur les rivages en plages de sable : MM. CASTANHO et PELNARD-CONSIDÈRE.

SUR LA HOULE PROPREMENT DITE ET SA SIMILITUDE

On sait qu'à la suite de la mise au point par MM. SANTON et MARCOU d'un appareil très sensible permettant l'enregistrement graphique d'une houle en Laboratoire, des anomalies dans la forme de la surface libre, qui semblait *a priori* devoir être quasi sinusoidale, avait conduit les auteurs à entreprendre l'analyse harmonique des relevés : l'existence de ces harmoniques a été signalée dès 1954 au Congrès de Grenoble du Coastal Engineering, mais depuis cette époque, sous l'impulsion de M. le Professeur KRAVTCHEKO, l'étude mathématique de ces problèmes a été activement poussée concurremment à la poursuite de l'expérimentation.

Ces travaux ont fait apparaître qu'à la houle progressive fondamentale de période T se superposent les harmoniques, ayant vraisemblablement aussi le caractère progressif, de périodes $2T/3$, $2T/5$, $2T/7$ avec prépondérance du premier harmonique.

Ces résultats pouvaient provenir soit de la non-linéarité de la houle, soit d'un phénomène stationnaire lié à la largeur du canal d'essai rapportée à la longueur d'onde de la houle.

M. MARCOU expose ici ses recherches concernant l'harmonique de période $2T/3$.

Pour cela il étudie la phase de cet harmonique en fonction de l'abscisse de la section de mesure, ce qui l'amène, pour préciser la position de cette section à compléter l'expression de la célérité de Airy par un terme tenant compte de la cambrure.

Jusqu'à ce jour il a observé entre la théorie et l'expérience des divergences qui l'empêchent de conclure formellement, mais un point nouveau très important est acquis, c'est que dans de telles études il est indispensable de disposer d'un appareillage qui assure la constance de la période du générateur au $1/10.000$ près. Il va de soi qu'une telle fidélité n'est nécessaire ici qu'en raison de l'extrême précision des mesures en cause; il n'en reste pas moins que son exposé attire l'attention des expérimentateurs sur l'importance dans les essais courants de cette donnée trop souvent considérée comme accessoire.

M. SANTON, dans sa communication, signale les perfectionnements apportés à son enregistreur qui, au moyen d'un peigne à 12 pointes, détermine le profil de la surface libre sur le passage d'une seule vague, ce qui permet maintenant de relever le profil d'une intumescence non périodique.

Il a fait porter ses recherches sur la présence de l'harmonique $T/2$ et du pseudo harmonique ayant cette même période, mais conservant la longueur d'onde du fondamental, éléments qui apparaissent dans les études théoriques de M. MICHE sur la houle non linéaire.

Ses contrôles sont basés sur le fait que pour les faibles cambrures, malgré la non-linéarité des équations, on peut admettre la superposition des petits mouvements.

L'état actuel des travaux de M. SANTON ne lui permet pas encore de conclure sur le fond; mais il a pu également établir que, pour des fortes cambrures, l'expression de la célérité de Airy n'est plus valable pour le calcul de la célérité, dès le second ordre.

Ces résultats expérimentaux étant acquis, le travail de M. KRAVTCHEKO ouvre aux mathématiciens des aperçus très nouveaux et très importants.

L'auteur a pu en effet analyser, en les complétant, des travaux russes des mathématiciens LAVRENTIEV et NEKRASSOV, jusqu'alors ignorés en France. Ces mathématiciens faisant appel à des méthodes de calcul nouvelles ont montré qu'il n'était pas nécessaire de faire état d'imperfections de l'appareillage générateur pour expliquer les divergences constatées entre la théorie linéaire classique et les travaux de M. MICHE d'une part, et l'expérimentation d'autre part, dès que la cambrure dépasse 2 pour 100.

Il n'est pas possible d'entrer ici dans le détail des calculs, d'ailleurs abrégés en raison du volume limité des communications, exposés par M. KRAVTCHEKO; les expérimentateurs retiendront seulement avec profit une expression plus précise de la célérité obtenue en complétant la formule de Airy, qui est, selon l'auteur :

$$C^2 = \frac{gl}{2} \operatorname{th} \left(\frac{2\pi H}{l} \right) \left(1 + \frac{6\pi a}{l} \operatorname{cth} \frac{2\pi H}{l} \right)$$

formule où :

H est la profondeur,

l la longueur d'onde,

g l'accélération de la pesanteur,

a le demi-creux de la houle.

Lorsque les expérimentateurs de Laboratoire établissent le programme d'un essai sur modèle comportant la représentation de la houle ou de seiches, ils utilisent pour déterminer les échelles de leur modèle, la classique similitude de Froude, avec ou sans distorsion suivant l'importance du terme $\operatorname{th}(2\pi H/l)$ dans l'expression de la célérité, et dans la plupart des cas, ils obtiennent entre le modèle et la nature une concordance très satisfaisante.

Il y a cependant des circonstances où des divergences sont observées qui ne peuvent être imputées ni aux mesures ni à l'appareillage : c'est, en particulier, le cas des essais où le modèle doit représenter correctement des dissipations d'énergie par viscosité, ou des cheminement de sables sous l'effet de la houle.

M. VALEMBOS semble avoir explicité ces phénomènes dans une étude qu'il a faite, des couches limites oscillatoires laminaires ou turbulentes, qui semble apporter aux ingénieurs un élément intéressant pour l'étude du dimensionnement des modèles et des matériaux devant y représenter le débit solide de charriage.

En effet, si, dans la nature, en présence de phénomènes de houles, de seiches ou de marées, la couche limite est presque toujours turbulente, par contre, à l'échelle usuelle des modèles, cette même couche limite est pratiquement toujours laminaire. D'où, selon M. VALEMBOS, les divergences observées.

En effet, à partir des travaux effectués à Berkeley par HUON-LI, M. VALEMBOS est parvenu à expliquer ces phénomènes; une application aux travaux de M. LARRAS, dont il sera rendu compte ici même dans la section dont le Rapport Général a été établi par M. l'Ingénieur en Chef LAVAL, relative « aux effets de la houle et du clapotis sur les fonds de sable », a permis d'aider la compréhension de ces phénomènes et a donné un groupement des points expérimentaux beaucoup plus serré que ceux précédemment obtenus par MADHAY MANOHAR.

SUR L'ACTION DE LA HOULE SUR LES OUVRAGES

Parmi les problèmes d'hydraulique maritime les plus souvent posés aux Laboratoires spécialisés figurent les études relatives à la consistance et à la stabilité des ouvrages extérieurs de protection. Les digues sont étudiées en canal lorsqu'il s'agit de leur profil courant attaqué par

une houle frontale, dans des cuves à houles où le phénomène peut se développer à trois dimensions s'il s'agit d'ouvrages particuliers à développement curviligne, de musoirs, etc., dans les autres cas.

Toutefois, ce genre d'études n'étant devenu

courant que depuis peu de temps, la comparaison entre les résultats obtenus sur modèle au Laboratoire, et sur l'ouvrage dans la nature, n'a pu être encore faite que dans un nombre limité de cas.

L'intérêt de la communication de M. SCHAEER provient de ce qu'il rapporte les très bonnes concordances qui ont été obtenues entre le réel et le modèle pour quatre ouvrages modernes importants.

La digue de l'est de Dunkerque, ouvrage de protection de l'évacuateur des walingues qui draine les plaines basses de Flandres, n'avait été que partiellement réparée après les destructions de la guerre : détruite partiellement en mars 1949, elle a été reconstruite selon un profil étudié en Laboratoire à Grenoble. Lors de la tempête de 1953, l'ouvrage nouveau a tenu alors que les profils voisins, qui n'avaient pas été améliorés, ont cédé.

La jetée est de Mers-el-Kébir, important ouvrage fondé à la cote — 30, a de même, lors des tempêtes d'avril 1954, tenu les promesses du modèle : malgré des houles sévères de 170 m de longueur d'onde et 7,5 m de creux, les blocs de 27 t ont à peine été déplacés et rangés face à face.

De même le brise-lames de Saint-Guérolé, assurant la grande passe du port, s'est comporté en novembre-décembre 1954, tant en ce qui concerne la stabilité de l'ouvrage que son aptitude à réduire les franchissements, à l'identique du modèle.

Enfin la prise d'eau de la Centrale thermique de Casablanca, protégée au moyen de deux digues pourvues de tétrapodes, assure de façon satisfaisante le service qui lui avait été assigné lors de l'établissement du programme d'essais sur modèles.

Il va de soi que la réalisation de telles études ne comporte pas seulement la reproduction des mouvements de l'eau à l'extérieur de l'ouvrage mais aussi la reproduction aussi exacte que possible de sa perméabilité : la stabilité des blocs de carapace dépend, en effet, en même temps que de leur forme, de leur poids et de leur arrimage, des pressions qui s'exercent simultanément sur leurs faces opposées, c'est-à-dire finalement plus ou moins directement de la porosité du massif sous-jacent : le projeteur se trouve en face du dilemme soit de blocs stables parce que soumis à des pressions différentielles faibles, mais alors l'ouvrage laisse passer une part de l'énergie et assure mal son rôle de protection, soit d'ouvrages étanches, mais alors la différence des pressions s'exerçant sur les parois des blocs devient notable et leur stabilité s'en trouve réduite d'autant.

Le problème se pose avec acuité lorsque les

digues doivent former barrage étanche, comme ce sera le cas pour les digues des futures grandes marémotrices ou dans le cas de seiches à longues périodes que l'on veut corriger en supprimant leur cause, c'est-à-dire le lent mouvement de l'eau au travers d'un ouvrage d'interception.

La communication de M. LE MÉHAUTÉ répond à la préoccupation des Laboratoires de trouver un critère de similitude de perméabilité pour les ouvrages soumis à des écoulements périodiques.

Le problème a été abordé par le calcul en partant de données largement schématisées à la base : équations de Navier (en principe valables pour les seuls écoulements laminaires) appliquées à des écoulements turbulents et adoption d'une fonction à potentiel dans un écoulement en milieu poreux alors que cette notion n'est licite en toute rigueur qu'avec un régime laminaire.

Des calculs brillamment menés conduisent à des résultats qui, en particulier, montrent que les phénomènes d'inertie en cette matière ne peuvent être négligés ; ils permettent pour chaque cas particulier (houle de période et de creux donnés) de déterminer la distorsion à donner à la granulométrie d'un massif, en modèle, pour y avoir un comportement semblable à celui qu'on observe dans un massif réel donné.

L'effort entrepris apporte manifestement des clartés nouvelles sur un phénomène jusqu'ici mal connu, mais il semble prudent de n'entrer dans cette voie qu'avec beaucoup de précaution et nous ne pouvons que nous associer aux réserves faites à ce sujet par M. BOURRIÈRE, dans sa communication au présent Congrès sur les seiches du port de Tamatave : on a linéarisé des vitesses pour être dans des conditions de perméabilité identiques, mais cette linéarisation n'est strictement valable que pour une période et un creux de houle et, s'il y a gradient de vitesse sur une hauteur, le coefficient de distorsion granulométrique devra même en tenir compte : cela, semble-t-il, réduit notablement le champ d'application d'une méthode qui conduit à représenter en modèle un ouvrage dans des conditions telles que cette représentation n'est plus valable dès que la période ou même le creux de la houle viennent à changer.

Pour résoudre le problème, il semble que soit les analogies électriques telles que celles qui ont été utilisées pour étudier la percolation en régime varié dans la digue de Serre-Ponçon, soit un modèle hydraulique en similitude de Froude réalisé à une échelle assez grande ($> 1/25$ en général) pour que la nature des mouvements liquides soit pratiquement la même dans le modèle et dans le réel, permettent plus valablement d'arriver aux résultats recherchés.

SUR L'ACTION DE LA HOULE SUR LE FONCTIONNEMENT DES GROUPES HYDROÉLECTRIQUES MARÉMOTEURS

Ce problème d'une éminente actualité en raison du prochain démarrage du chantier de l'usine Rance a été abordé en collaboration, pour la partie hydraulique, par MM. DUPORT et FAVEZ et, pour la partie électrique, par M. ROBERT.

Il est basé sur l'étude théorique entreprise par le regretté Paul ALMÉRAS qui schématisait la pénétration de la houle dans le pertuis d'aval des machines par une pulsation de pression à la sortie ou à l'entrée de la turbine, en admettant d'ailleurs la création à l'extrémité du pertuis d'un clapotis pur, c'est-à-dire l'inexistence d'une composante horizontale d'un courant provoqué par la houle.

L'étude expérimentale a été menée en similitude de Froude en faisant tourner la turbine à la vitesse homologue et en l'accouplant au moyen d'un tortiomètre extra sensible à un

alternateur en synchronisme tournant à une vitesse constante obligée. En outre, les effets d'inertie ont été pris en compte en utilisant une roue de turbine extra légère et un groupe de micromachines représentant l'usine Rance, d'une part, et, un groupe d'autres usines E.D.F., d'autre part. Les résultats partiels déjà obtenus montrent qu'il y a réaction de l'écoulement de sortie sur le clapotis, ce qui diminue par rapport à la théorie l'amplitude des pulsations; néanmoins, il y a application d'un couple pulsatoire sur l'arbre de l'alternateur, mais pour la Rance cela ne risquera jamais d'entraîner la perte de synchronisme de l'usine, seules varieront les puissances transitées.

Enfin la mise en résonance de l'installation sous l'effet de la houle ne risque pas de se produire, puisqu'elle correspondrait à une période de houle de une demi-seconde.

SUR L'ACTION DE LA HOULE SUR LES RIVAGES EN PLAGES DE SABLE

La très intéressante communication de M. José Pires CASTANHO concerne la reproduction en modèle de flèches littorales, ou langues de sable, observées sur certaines côtes sableuses du Portugal et d'Angola : l'auteur a effectué une étude systématique de ce phénomène et a pu ainsi tirer des conclusions précises sur l'influence des divers paramètres en cause, périodes, amplitudes de la houle, débit solide, etc.

Il a analysé en détail le processus de formation et de développement des flèches; c'est ainsi qu'il a fait apparaître « l'effet de musoir » qui se manifeste à l'enracinement du cordon et noté les pentes différentes de ses deux versants.

Enfin, en admettant une schématisation nécessaire de ce phénomène complexe, il en a proposé une explication mathématique simple permettant de prédéterminer les caractéristiques — direction, progression, largeur, etc. — des flèches naturelles.

La bonne concordance entre ses essais au Laboratoire et les observations faites sur les côtes, en particulier en Angola, observations qui font ici, d'autre part, l'objet d'une communication de M. ABECASSIS, dans la section dont le rapport général avait été confié à M. le Professeur LACOMBE, sont la garantie que cette technique d'essais est maintenant assise sur des bases solides.

La communication de M. l'Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées PELNARD-CONSIDÈRE,

relative à l'évolution des rivages en plages de sable et de galets, élève sur le plan général la question particulière précédente : elle a le grand mérite de synthétiser des observations que l'auteur poursuit à la fois au Laboratoire et dans la nature depuis près de vingt ans.

Si, en effet, les idées exposées par M. PELNARD-CONSIDÈRE se trouvent déjà en germe dans un rapport présenté en 1935 au XVI^e Congrès International de Navigation, elles ont maintenant, après de multiples observations, pris la forme d'une théorie complète et cohérente qui permet la prédétermination de l'évolution d'une côte dont des travaux, dus à l'action de la nature ou de l'homme, ont modifié les conditions initiales.

Il faut féliciter en outre l'auteur d'avoir su, dans le petit nombre de pages qui lui était imparti, résumer l'essentiel d'une théorie qui justifie de beaucoup plus larges développements.

L'auteur a montré que lorsqu'on s'oppose par la création d'un ouvrage au cheminement côtier naturel, on peut décomposer l'évolution de la cote en deux stades successifs : d'abord en engraissement de la zone amont, avec corrélativement un démaigrissement de la région aval, qui comporte une homothétie par rapport à l'enracinement de l'épi dans le rapport de la racine carrée des temps; ensuite dès que le profil de la côte a atteint l'extrémité du musoir

au bout d'un temps t_1 une stabilisation de la forme du rivage se déduisant de sa forme au temps t_1 , par une affinité par dilation des abscisses comptées à partir de l'épi dans le rapport :

$$\sqrt{\frac{t - 0,38 t_1}{0,62 t_1}}$$

D'autre part dès que le rivage atteint l'extrémité du musoir, la quantité de matériaux franchissant l'ouvrage croît d'abord très rapidement pour atteindre le tiers du cheminement, puis plus lentement ensuite suivant une loi qui a pu être précisée.

La théorie de M. PELNARD-CONSIDÈRE permet également de suivre l'évolution d'un rivage qui fait l'objet localement d'un apport massif de matériaux comme c'est le cas d'un delta d'embouchure, ou de dragages massifs.

S'il est vrai que l'on mesure l'état d'avancement d'une science ou d'une technique à la possibilité d'exprimer un résultat sous une forme mathématique, on peut assurer que le travail de M. PELNARD-CONSIDÈRE a fait faire à la science des rivages un progrès décisif; en effet les essais de laboratoire, en attendant les applications directes aux travaux naturels qui ne manqueront pas d'être prochainement réalisés, con-

firmement de façon très satisfaisante l'excellence de cette théorie.

Pour conclure ce bref exposé, je ferai tout d'abord observer combien l'introduction de la recherche sur modèles de Laboratoire a, en peu d'années, révolutionné en la rénovant la technique des travaux maritimes. Pendant longtemps ceux-ci avaient dû leur progression bien plus à l'amélioration des moyens matériels mis à la disposition des ingénieurs, qu'au perfectionnement de la connaissance scientifique des phénomènes; l'intervention des Laboratoires a permis de combler un hiatus que la seule expérience professionnelle ne parvenait pas à dominer.

Cependant si les Laboratoires, à qui maintenant on a couramment recours pour la réalisation d'ouvrages importants, devaient se cantonner dans un simple rôle d'expérimentateurs, ils failliraient à leur mission. C'est seulement en associant toujours d'une façon plus intime la déduction mathématique à l'observation que l'on pourra utilement progresser.

Les communications apportées à ces 4^{es} Journées de l'Hydraulique en montrant que cette voie est suivie par tous, donnent pour l'avenir mieux que des gages pour le développement des techniques auxquelles nous sommes attachés.

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

DISCUSSION

M. le Président rappelle que la notion de similitude est une des premières intuitions de l'humanité. L'univers des hydrauliciens est resté euclidien. Mais si la forme première de la similitude fut surtout qualitative et approximative, le modèle réduit d'aujourd'hui prétend donner une mesure exacte et rigoureuse et l'ingénieur qui le construit ou l'utilise est obligé de faire appel à toutes les ressources des mathématiques et à toutes les finesses de la physique.

M. GRIDEL présente le rapport général.

A propos du rapport n° 6 de M. LE MÉHAUTÉ sur « la perméabilité des ouvrages maritimes aux ondes de gravité périodiques », M. KRAVTCHEKHO estime que l'hypothèse de la proportionnalité de la forme de frottement à la vitesse, peut être justifiée théoriquement — sans trop de rigueur — chaque fois que l'on se place à une échelle convenable; toutefois les raisonnements qui conduisent à cette conclusion sont classiques. Ils sont analogues à ceux qu'on utilise dans la théorie des oscillations dans les conduites. M. KRAVTCHEKHO ne peut, *a priori*, préciser les limites de la validité de ce résultat.

Au sujet de son propre rapport et de celui de M. MARCOU, il insiste sur les écarts constatés entre les mesures de M. MARCOU et la formule théorique de Nekrassov. De plus, celle-ci semble en contradiction avec les résultats classiques de LEVI-CIVITA et de Mme DUBREUIL.

Pour M. MICHE, la vérification expérimentale de l'exactitude des termes du second ordre de la houle ressortant des rapports de MM. KRAVTCHEKHO ET SANTON, bien que valable pour des cambrures non supérieures à 2,5 %, présente non seulement un intérêt théorique, mais des incidences pratiques appréciables :

1. En profondeur, l'ondulation des couches liquides est beaucoup moins marquée qu'en surface. On devrait donc en inférer que les termes du second ordre traduisent alors correctement les faits expérimentaux, même pour les houles très cambrées. Ceci concerne, notamment, le diagramme des pressions produites par un clapotis sur une digue verticale. On sait qu'elles sont nettement différentes, à une certaine profondeur, de celles ressortant de la théorie habituelle du premier ordre d'approximation.

2. A grande profondeur même, certains termes du second ordre deviennent prédominants et conduisent par exemple, lorsqu'il y a clapotis même partiel, à des pulsations de pression, de fréquence double de celle de la houle, qui sont très vraisemblablement à l'origine de certains micro-séismes.

3. Au surplus, la majorité des houles naturelles ont des cambrures non supérieures à 3 % et, par conséquent, la prise en compte des termes du second ordre apparaît légitime la plupart du temps.

Ces faits montrent, par ailleurs, que la recherche théorique de mouvements de houles de plus en plus approchés, selon les méthodes inaugurées par M. KRAVTCHEKHO par exemple, et leur contrôle par des procédés très précis, comme l'a fait M. SANTON, ont un intérêt théorique et pratique indéniable, ce qui devrait encourager ces auteurs à persévérer dans cette voie, en vue d'élucider certains aspects, encore inexpliqués, du comportement des houles.

M. SANTON précise que, depuis la rédaction de son rapport, il a entrepris des mesures pour préciser la limite des cambrures donnant des vérifications satisfaisantes.

Ces mesures ne sont pas terminées, mais une cambrure de 2,11 % a donné d'aussi bons résultats que ceux mentionnés dans le rapport. Il semble que l'accord avec la théorie de M. MICHE soit encore meilleur que celui dont M. MICHE s'est félicité dans son intervention.

En l'absence de M. LE MÉHAUTÉ, M. BIESEL répond aux observations de M. GRIDEL sur son rapport.

Il n'a pas été dans l'intention de M. LE MÉHAUTÉ de faire une théorie rigoureuse de l'écoulement turbulent en milieu poreux anisotrope. Cela serait, d'ailleurs difficile, alors qu'on est encore dans l'ignorance de la théorie de l'écoulement en conduite. Aussi, M. LE MÉHAUTÉ fait-il des approximations basées sur la connaissance expérimentale — déjà très grande — des lois de l'écoulement dans un massif dont la structure et la granulométrie, sont plus ou moins bien connues. Il juge, ensuite, de la valeur de ces approximations par les résultats qu'il obtient :

1. Le fait que la vitesse varie, nécessiterait effectivement en toute rigueur d'introduire pour la granulométrie une distorsion variable dans le massif. En pratique, on peut se contenter d'une valeur moyenne pour chaque catégorie d'enrochements. On fait ainsi une erreur dont on peut évaluer l'ordre de grandeur, grâce — précisément — à la théorie proposée.

2. En ce qui concerne les variations des caractéristiques de la houle, on a rarement à faire plus de deux modèles : un pour les houles faibles, un autre pour les houles fortes. Le plus souvent un seul suffit.

3. En ce qui concerne la précision, il y a principalement deux types de problèmes :

- a) *Les questions où la perméabilité de l'ouvrage est l'élément essentiel*, dans le cas de la pénétration des seiches dans un bassin, par exemple. Dans ce dernier cas, le travail de M. LE MÉHAUTÉ, s'il ne conduit pas à une précision rigoureuse, permet en tout cas de donner un ordre de grandeur des erreurs que l'on peut faire. De plus, la distorsion qu'il propose permet de réduire ces erreurs considérablement, tandis que sans elle, même les ordres de grandeur ne seraient pas respectés.

L'analogie avec un réseau électrique, n'échapperait aux critiques faites à la méthode de M. LE MÉHAUTÉ et concernant la non-linéarité des frottements et de l'inertie, que si l'on introduisait des non-linéarités et des selfs dans le réseau analogique, ce qui conduirait à une complexité beaucoup trop grande.

Pour ce qui est de la solution qui consiste à accroître l'échelle, il faut noter que même en montant jusqu'à $1/10^6$ — ce qui fait une échelle très grande pour le laboratoire — les abaques de M. LE MÉHAUTÉ montrent que l'on a encore 3,5 comme ordre de grandeur de distorsion, ce qui reste considérable.

Le très grand intérêt pratique du procédé de M. LE MÉHAUTÉ est qu'il permet, au moins sur le plan de la perméabilité, d'obtenir un résultat très supérieur avec des échelles plus faibles ($1/40$, $1/50$, par exemple). Il en résulte une augmentation de la souplesse d'essais qui n'est pas négligeable.

- b) *Les questions de la stabilité où la perméabilité n'a généralement, qu'un rôle accessoire*; toutefois, les sous-pressions y jouent un très grand rôle, lorsque le parement lui-même est imperméable. Dans le cas contraire, les pertes de charge à travers les parements sont

très faibles et les sous-pressions moins importantes. Dans ces deux cas, seul l'ordre de grandeur approximatif de la perméabilité doit être conservé et la méthode de M. LE MÉHAUTÉ est largement assez précise.

Sur l'utilisation du procédé de M. LE MÉHAUTÉ dans le cas de la pénétration des ondes de seiches à travers les digues, M. VALEMBOIS fait une distinction entre les ondes progressives, et les ondes réfléchies par un obstacle situé à l'aval de la digue. Dans ce dernier cas, la linéarisation des pertes de charge dans le massif ne permet pas une représentation du transfert d'énergie à travers le massif susceptible de conserver sa fidélité lorsque le champ des vitesses varie. Il pense qu'il faudrait d'abord établir la fonction de transfert pour un massif déterminé, puis, cette fonction étant connue, essayer de réaliser un dispositif expérimental qui ait une même fonction de transfert avec des pertes de charge quadratiques : s'il y a lieu, par exemple, une série de plaques perforées, dans lesquelles les trous et les distances entre plaques auraient des valeurs convenables.

M. BIESEL se déclare d'accord avec M. VALEMBOIS sur la nécessité de chercher quelque chose qui permette d'assurer une similitude encore meilleure, mais il y a une difficulté. Il fait tout d'abord une remarque préliminaire et considère pour cela une darse allongée, telle que celle représentée sur la figure ci-dessous et fermée

par un ouvrage perméable. C'est un cas très simple (mouvement à deux dimensions) mais qui suffira à donner une idée de ce qui se passe dans des cas plus complexes. L'étude théorique et expérimentale semble montrer que les mouvements dans cette darse ne s'emballent pas; ils peuvent même être très faibles, en particulier lorsqu'il y a en A un ventre de mouvements horizontaux. C'est le cas de l'antirésonance où il y a compensation parce que, quoique l'ouvrage soit placé en un ventre (maximum) des mouvements horizontaux, de toute façon l'agitation est faible, si bien que même le maximum n'est pas élevé en valeur absolue.

Au contraire, lorsqu'on est dans le cas de la résonance, il y a en A un nœud pour les mouvements horizontaux, c'est-à-dire que ceux-ci sont pratiquement nuls; si l'on s'écarte de la résonance ils ne seront pas tout à fait nuls, mais l'ensemble du mouvement sera moins important, donc cela tend à se compenser un peu. En résumé les mouvements dans l'ouvrage seront le plus souvent *peu importants*, ce qui tend à rendre plus acceptable le procédé de linéarisation valable à la limite pour des mouvements très lents. Cependant M. BIESEL ne conteste pas que c'est une faiblesse de la méthode actuelle de M. LE MÉHAUTÉ.

Il craint cependant que cette faiblesse ne se rencontre à peu près dans tous les dispositifs qu'on pourrait imaginer parce que, malheureusement, dans la nature, dans les massifs réels et surtout si les vitesses sont relativement faibles, on est loin d'être au régime turbulent complètement développé; on est dans un cas d'écoulement intermédiaire où les pertes sont assez différentes des pertes quadratiques.

Au fond, la loi de variation du coefficient de perméabilité, en fonction des nombres de Reynolds, de la porosité, etc., est très compliquée. C'est une loi tellement compliquée que M. BIESEL ne croit pas que l'on puisse raisonnablement espérer pouvoir faire beaucoup mieux que M. LE MÉHAUTÉ par un dispositif simple et pas trop coûteux. Par ailleurs, il se rencontre avec M. GRIDEL sur l'idée que l'imprécision qui existe dans la réalité des faits ne justifie pas de gros efforts pour les représenter avec beaucoup plus de précision et fidélité.

M. SCHNEEBELI répond à M. BIESEL au sujet de la difficulté que l'on rencontre pour représenter correctement les pertes de charge dans un milieu poreux. Il reconnaît que le problème posé est difficile, mais estime qu'il n'est pas impossible de lui donner une solution. Il signale à ce sujet des essais de représentation analogique d'un massif d'enrochements qu'il avait entrepris au Laboratoire de Chatou mais qui n'avaient malheureusement pas pu être poursuivis. L'idée directrice était l'extension de l'analogie de Hele-Shaw (écoulement entre 2 plaques rapprochées) au régime turbulent. On pouvait penser *a priori* qu'il suffisait d'augmenter l'écartement des plaques, mais cette première idée était erronée. En effet, l'apparition de la turbulence dans un écoulement entre 2 plaques parallèles se fait brusquement comme dans un tuyau. Par contre, lorsqu'on a placé des obstacles entre les plaques, on a obtenu des courbes $C_f = F(R)$ tout à fait comparables à celles d'un massif de cailloux par exemple. Evidemment, les essais signalés ont été faits en régime permanent. Il faudrait les reprendre en régime périodique. Par ailleurs, on rencontrera probablement quelques difficultés dans l'ajustement des valeurs numériques des pertes de charge.

A une remarque de M. BIESEL, M. SCHNEEBELI répond qu'il est tout à fait d'accord pour souligner que la représentation des pertes de charge à travers la digue n'est qu'une partie du problème. Ce résultat une fois acquis, il faudra arriver à raccorder la représentation analogique de la digue et la représentation en similitude de Froude des conditions amont et aval.

De l'avis de M. SCHNEEBELI il y aurait donc, pour arriver au résultat, une autre voie que celle empruntée par M. LE MÉHAUTÉ, mais cette dernière, conclut-il, a le grand mérite d'avoir dès maintenant conduit à des résultats concrets.

M. LARRAS signale, d'accord avec M. PELNARD-CONSIDÈRE que la théorie fort intéressante de ce dernier comporte probablement des limites de validité du côté des très faibles diamètres de matériaux mobiles (vases fines, par exemple). Il signale, d'autre part l'existence d'une solution de l'équation aux dérivées partielles de M. PELNARD-CONSIDÈRE dans laquelle la ligne du rivage se présente comme une somme de fonctions sinusoïdales dont chacune décroît exponentiellement de façon différente en fonction du temps. Toute ligne de rivage tend donc vers la ligne droite, mais ce sont les petits crochets qui s'effacent le plus vite et l'on s'explique ainsi les formes à longues ondulations molles des rivages non encore parfaitement rectilignes.

La séance est levée à 12 h 5.

La séance reprend le vendredi matin à 11 h 15 sous la présidence de M. GRIDEL avec la projection d'un film que présente M. D. BONNARD. Celui-ci précise que le laboratoire de l'Ecole Polytechnique de Lausanne n'a pas comme activité principale les phénomènes de la houle mais plutôt les aménagements hydro-électriques. Le laboratoire n'a qu'une installation modeste dans le domaine de la houle et s'attache à résoudre un certain nombre de problèmes de principe. Le film qu'il présente provient de coupures prélevées dans un film général tourné récemment pour l'étude exécutée à l'échelle 1/70 d'une jetée en enrochements exposée à une houle normale : la jetée nord du port de Samsun, en Turquie, sur la mer Noire. Il pense que le laboratoire de Lausanne a légèrement innové dans les méthodes en procédant de telle manière que l'on puisse observer simultanément le comportement, sous une même houle, de sections d'ouvrages de constructions légèrement différentes. Les essais sont à deux dimensions en canal.

Le film montre : une vue à vol d'oiseau du bassin utilisé (le générateur de houle est pneumatique); une coupe profil de l'installation (le canal est vitré sur une partie de sa longueur dans le voisinage du modèle); différents tronçons du couloir permettant de voir les diverses célé-

rités de la houle, la canalisation qui amène l'air dans la cloche à air du générateur de houle (au voisinage de cette cloche, la houle n'est pas pure, mais elle s'améliore au fur et à mesure qu'elle s'approche du modèle proprement dit); on peut enregistrer les caractéristiques de la houle en mesurant des pressions à une certaine profondeur; l'appareillage n'est pas très simple du fait que le tarage doit être renouvelé après chaque série d'expériences. La deuxième partie du film montre, au lieu des carapaces en bloc de béton armé, étudiées dans la première partie, des blocs naturels en vrac.

M. GRESLOU intervient pour préciser qu'au laboratoire de Grenoble on a également effectué des essais simultanés de plusieurs profils en cloisonnant partiellement l'installation; mais il faut que les coefficients de réflexion des deux profils soient très voisins pour éviter de perturber la houle incidente.

Pour répondre à la question posée la veille par M. GRIDEL à propos du rapport de M. SCHAEER, M. GRESLOU précise que les échelles utilisées pour les essais étaient le 1/50 pour trois d'entre eux et le 1/40 pour Saint-Guénolé, échelles habituelles des essais de stabilité de ce laboratoire. Il ne peut être question d'étudier la stabilité sur des modèles habituels d'agitation à des échelles du 1/150 au 1/200, mais il y a lieu alors d'ajuster le coefficient de réflexion des ouvrages par des dispositifs expérimentaux appropriés. Enfin le fait de ne pas reproduire correctement la perméabilité des ouvrages, dans une étude de stabilité d'un ouvrage à la houle, n'introduit qu'une erreur en général négligeable et agissant, de plus, dans le sens de la sécurité.

M. GRIDEL signale avoir vu, il y a 6 ou 7 ans, au laboratoire de Delft, dans le grand canal à houle, plusieurs profils qui étaient étudiés concurremment dans les mêmes cuves, avec un guideau de séparation. Les échelles utilisées étaient du même ordre que celles citées par M. GRESLOU. Il pense que l'attention doit se porter sur

l'importance de l'échelle à adopter sur le modèle : celle-ci joue dans le sens de la sécurité lorsque le modèle a pour objet d'étudier l'agitation qui traverse l'ouvrage puisque par l'effet même de la réduction on a des écoulements plus laminaires dans le modèle que dans la réalité : par contre ce même effet rend le modèle optimiste en ce qui concerne la stabilité des blocs qui le constituent.

A ce sujet, M. SCHIFF tient à préciser que, au laboratoire de Delft, dans le cas d'essais simultanés sur plusieurs profils, on a toujours pris la précaution de répéter les essais avec un ordre renversé des profils, c'est-à-dire, que le profil qui se trouvait à gauche une fois, était mis à droite la fois suivante. De toute façon on a évité l'influence possible d'une asymétrie de la houle due à une réflexion différente des profils séparés.

A une question de M. CHRISTOFFEL sur le tonnage des blocs employés, M. BONNARD répond que tous ces détails se trouvent dans son rapport qui vient juste d'être diffusé.

M. GRIDEL revient sur une remarque faite par M. BONNARD au sujet de la meilleure tenue des blocs naturels par rapport à des blocs artificiels ayant des formes géométriques précises, (cube, parallélépipède, et, en particulier, pyramide) mais fait un distinguo pour les tétrapodes. Ce dernier précise que lors de l'étude de la jetée du port Nord à Gênes, la houle ayant un maximum de l'ordre de 1,80 m, il avait le choix entre des cubes de béton ou des blocs erratiques arrondis; ces derniers ont beaucoup mieux tenu au modèle; l'inconvénient est que l'ouvrage est moins efficace en ce qui concerne la destruction de la houle.

M. GRIDEL après avoir souhaité un plus grand échange de vues entre les laboratoires d'essais ayant un caractère maritime, clôt la séance.

La séance est levée à 11 h 55.

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