Énergie mécanique de la marée : Essais sur modèles

Mechanical energy of tides : Scale model tests

PAR

L. VANTROYS

INGÉNIEUR HYDROGRAPHE EN CHEF DE LA MARINE (C. R.)
CHEF DU SERVICE D'ÉTUDES SUR L'UTILISATION DES MARÉES A L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Un article récent, publié par la revue anglaise *The Dock & Harbour Authority* (*), soulignait les us et abus des modèles réduits. En fait, use-t-on suffisamment des modèles réduits, en abuse-t-on ?

Autrefois, la seule expérience des ingénieurs de travaux maritimes était celle de leurs prédécesseurs, qu'ils connaissaient incomplètement par des rapports plus ou moins objectifs mais qu'en tout cas ils n'avaient pas vécue, et la leur propre, forcément limitée à un nombre restreint d'ouvrages. L'une et l'autre concernaient des constructions réelles en vraie grandeur et devaient — sauf erreur d'appréciation — comporter une bonne marge de sécurité qui excluait fatalement la recherche précise des seuils de stabilité et l'étude complète des différents phénomènes en jeu dont l'aspect change avec les valeurs des paramètres.

Aujourd'hui, des Laboratoires d'Hydraulique se sont installés un peu partout dans le monde, et tout particulièrement en France, et ont acquis dans la représentation des phénomènes et dans leur interprétation une expérience qui s'accroît chaque jour et ouvre ainsi sans cesse de nouvelles possibilités d'études. Il semble donc tout naturel à un maître de l'œuvre consciencieux et avisé d'affecter quelques millions aux « essais » d'un ouvrage dont la réalisation coûtera plusieurs milliards que l'on désire employer à bon escient. Nous nous rangerons volontiers à la conclusion de l'article cité qui classe les éventuels « abus » en deux catégories : d'une part les essais « inutiles », qui sont d'ailleurs fort rares (il est généralement impossible d'affirmer qu'un « essai »

qualifié d'inutile n'ait pas joué un rôle, ne serait-ce que dans le subconscient des projeteurs qui ont assisté à l'essai) et dont le bilan passif est limité au coût de l'essai; d'autre part les essais « mal interprétés », dont les conséquences risqueraient dans bien des cas d'être catastrophiques. Disons tout de suite — et nous le montrerons sur le cas particulier qui nous occupe aujourd'hui — qu'un effort constant de discussion, conduit avec un esprit critique aiguisé, anime en France tout le corps des techniciens intéressés par les problèmes d'ouvrages hydrauliques.

Pour ce qui concerne les ouvrages à construire dans une mer à marée, les premiers problèmes qu'on s'est proposé de résoudre à l'aide d'un modèle étaient d'*hydrodynamique pure* : comment l'eau circulera-t-elle dans les ouvrages projetés ? Par une réalisation de plus en plus serrée des conditions reproduisant le phénomène naturel (conditions aux limites, rugosité, etc.), on est arrivé dans ce domaine à de nombreux résultats pratiques assurément valables.

Mais les ingénieurs sont devenus de plus en plus gourmands d'informations à demander au modèle, et le simple schéma d'un liquide s'écoulant le long de parois rigides et imperméables est, dans bien des cas, devenu insuffisant. On aborde aujourd'hui l'étude des débits d'*infiltration* (non seulement en régime laminaire, mais encore en régime turbulent), et celle des phénomènes de transports solides par mise en *suspension* dans la masse d'eau en mouvement ou par *charriage* sur le fond. Dans ces extensions de la technique des modèles, l'esprit critique du physicien doit s'allier à une bonne connaissance des théories mathématiques utilisées.

Dans un autre ordre d'idées, la notion de « modèle » peut elle-même être généralisée. En

(*) "The Dock & Harbour Authority", n° 425-XXXVI, mars 1956, page 337.

ne se limitant plus à la représentation « hydraulique » d'un phénomène « hydraulique » (l'échelle seule ou les échelles — horizontale et verticale — différenciant la nature de son image), on peut songer à toute la diversité des modèles analogiques où un écoulement fluide a pour image un courant électrique, un champ électrostatique, un champ magnétique, ou tout autre phénomène physique pour lequel, moyennant une correspondance appropriée entre grandeurs de natures diverses, les équations qui le déterminent sont les mêmes que celles qui déterminent l'écoulement hydraulique naturel étudié. Parmi les rapports présentés, l'une des communications concerne la schématisation d'une onde de marée, fonction sinusoïdale du temps, par les potentiels auxquels s'établissent les nœuds d'un réseau maillé. Une autre communication reprend les équations du même problème (détermination schématique — dans certaines conditions — d'une onde de marée fonction sinusoïdale du temps) et les résout à l'aide d'une calculatrice arithmétique, le modèle ainsi constitué étant réalisé par la calculatrice convenablement programmée... Nous touchons ici aux bornes du domaine normalement inclus dans notre exposé, car on pourra soutenir, non sans raison, que la résolution d'un problème hydraulique par des formules mathématiques et des calculs numériques revient à se passer purement et simplement de modèle hydraulique. Pratiquement, compte tenu de la schématisation introduite nécessairement par un calcul numérique, un tel calcul ne se substituera pas à un modèle réduit, mais pourra permettre, par exemple, d'en prolonger le domaine de validité en déterminant les modifications aux conditions aux limites pouvant résulter des implantations d'ouvrages sur le modèle.

Problèmes d'hydrodynamique pure

(Nous entendons par là les problèmes d'où la mobilité et la perméabilité des parois sont exclues; nous parlerons plus loin des problèmes d'infiltration, de suspension et de charriage.)

CONDITIONS AUX LIMITES

On entend par là les conditions qu'il convient de réaliser à la frontière de l'emprise planimétrique du modèle (le frottement sur le fond, et par conséquent la rugosité à réaliser sur ce fond, sont — dans le langage courant du laboratoire — considérés comme faisant partie des conditions « intérieures » relatives à un modèle d'écoulement à surface libre). Ces conditions peuvent être de deux sortes principales :

a) Réalisation d'un niveau donné en chaque frontière (plus précisément, d'une loi donnée

de variation du niveau en fonction du temps) : *condition du type de Dirichlet*;

b) Réalisation d'un courant normal donné en chaque point frontière : *condition du type de Neumann*.

La présence d'une paroi limitant l'écoulement équivaut à une condition de la forme b), la réaction de cette paroi imposant la nullité de la composante normale du courant.

Plus généralement, les conditions rencontrées en pratique ont un caractère mixte : forme a) sur certains tronçons de la frontière, forme b) sur les autres tronçons. Souvent même on s'impose — et même on réalise pratiquement — un ensemble surabondant de conditions, en précisant à la fois niveau, courant normal et courant tangent à la ligne frontière. Une discussion serrée des cas correspondants montre que, un même degré de précision n'étant pas attaché à la réalisation de chacune des conditions, on réalise en fait un compromis entre les diverses données. D'ailleurs, les conditions de compatibilité entre données surabondantes sont évidemment vérifiées dans la nature : elles doivent donc l'être encore sur le modèle.

La communication de M. G. SURREL, sous le titre : *Appareils à reproduire la marée. Evolution et état actuel* (1), nous expose comment, aujourd'hui, les Laboratoires d'Hydraulique savent, en un point frontière d'un modèle, réaliser un niveau représentant correctement une loi de marée connue.

La communication de M. L. GRESLOU, sous le titre : *Le réglage des courants sur un modèle à marée* (2), nous montre comment se réalisent les courants à la limite du modèle.

RÉGLAGE DE L'ENSEMBLE DU MODÈLE

La communication de MM. X. MICHON et J. GODDET sous le titre : *Aménagement de l'estuaire de la Rance. Modèle réduit de la station d'essais de Saint-Malo - Saint-Servan* (3), détaille les problèmes rencontrés dans le réglage d'ensemble d'un important modèle.

La communication de MM. X. MICHON et R. BONNEFILLE sous le titre : *La marée dans la Manche. Construction et réglage d'un modèle réduit* (4), aborde les difficultés soulevées par le fait que, dans l'aire géographique représentée par le modèle, l'action de la rotation de la Terre est sensible dans la nature, insensible sur le modèle.

La communication de M. A. PELTIER, sous le

(1) Voir Annexe A.

(2) Voir Annexe B.

(3) Voir Annexe C.

(4) Voir Annexe D.

titre : *Intégration numérique de l'équation aux dérivées partielles* :

$$\frac{d^2Z}{dx^2} + \frac{d^2Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0$$

traite du réglage d'un modèle maillé électrique schématisant l'oscillation de la marée dans une aire donnée (5).

La communication de M. J. CARTERON sous le titre : *Utilisation d'un calculateur électronique pour l'intégration numérique de l'équation aux dérivées partielles* :

$$\frac{d^2Z}{dx^2} + \frac{d^2Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0$$

résoud le même problème par un processus de calcul digital (6).

Problèmes d'infiltration, de suspension et de charriage

La communication de M. G. COHEN DE LARA, sous le titre : *Etude de l'infiltration dans les digues en enrochements. Application au cas des batardeaux de coupure* (7), prolonge, vers le domaine des régimes turbulents, les études qui avaient conduit Darcy à la formulation des lois

de l'écoulement de filtration en régime laminaire.

La communication de MM. J. LABETOULLE et P. PEUTOT, sous le titre : *Représentation simultanée sur un modèle à marée des phénomènes de charriage et de suspension* (8), réalise une synthèse, souhaitée depuis longtemps, entre les conditions de similitude valables pour deux catégories de phénomènes qui coexistent souvent dans la nature et dont il est préférable de ne pas être obligé de dissocier les études.

La communication de M. G. MAUBOUSSIN, sous le titre : *Construction de l'usine marémotrice de la Rance. Contribution des essais sur modèle réduit à la mise au point d'un mode d'exécution des travaux* (9), met en évidence tout le parti que le maître de l'œuvre est en mesure de tirer d'essais bien conduits.

Prenant ainsi une connaissance exacte de tout ce qu'on sait aujourd'hui réaliser dans le domaine des modèles réduits de mers à marée et de toutes les informations qu'une discussion compétente peut en extraire, le lecteur jugera lui-même de l'opportunité de faire usage de modèles réduits pour traiter les problèmes de construction d'ouvrages maritimes. Pour le cas particulier des usines marémotrices, où l'expérience du passé est inexistante, l'emploi du modèle réduit s'impose.

ANNEXE A

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. SURREL

(Rapport n° 2)

APPAREILS A REPRODUIRE LA MARÉE. ÉVOLUTION ET ÉTAT ACTUEL

Prenant comme exemple l'appareil générateur de marée mis au point en 1947 au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique pour l'asservissement du niveau à la frontière du large du modèle de l'estuaire de la Rance, l'auteur applique au cas particulier de ce type d'instruments les considérations générales relatives à la conception et au calcul des servomécanismes. Partant des développements théoriques publiés par MM. AILLERET, GIBRAT, NASLIN et NASSE et adoptant le langage et les notations de la Transformation de Laplace, il calcule les caractéristiques qu'il convient de donner à un dispositif commandant (par le mouvement de volets déversants) le débit instantané

extrait du modèle pour réaliser, fidèlement et sans oscillations gênantes (baptisées « pompage »), une loi donnée de variation du niveau en fonction du temps, loi matérialisée par la réalisation d'une came.

Comme introduction à cet exposé, une mention rapide est faite de quelques appareils « générateurs de marée » anciens.

Dans la conclusion, l'auteur décrit les deux appareils les plus modernes réalisés en France, l'un par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (générateur de marée en service à Grenoble), l'autre par le Laboratoire National d'Hydraulique (appareil en service à Saint-Servan).

(5) Voir Annexe E.

(6) Voir Annexe F.

(7) Voir Annexe G.

(8) Voir Annexe H.

(9) Voir Annexe I.

ANNEXE B

(Rapport n° 6)

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. L. GRESLOU

LE RÉGLAGE DES COURANTS SUR UN MODÈLE A MARÉE

L'auteur rappelle que les déplacements horizontaux de l'eau sont l'un des aspects essentiels du phénomène de la marée. Ces déplacements, qui accompagnent les variations du niveau, se traduisent par des courants de même périodicité qui sont parfois *alternatifs* (c'est-à-dire de direction fixe, mais de sens variable, l'intensité s'annulant au changement de sens), mais plus souvent *giratoires*, le calage en phase d'une composante du courant par rapport à la dénivellation dépendant de la nature *progressive*, *stationnaire* ou *complexe* de l'onde de marée.

Il mentionne ensuite diverses questions telles que la mise en place d'un batardeau fermant une baie ou un estuaire, la pratique de l'exploitation et de l'entretien d'une installation portuaire, la protection des côtes contre l'érosion, etc., où — en conjonction avec d'autres considérations (houle par exemple) — intervient la connaissance des courants de marée actuels et *futurs*, des essais sur modèle réduit pouvant permettre la détermination de ces derniers.

Comment donc reproduire exactement ces courants sur la frontière du modèle? En *introduisant* ou en *évacuant* des débits contrôlés. Les débits introduits peuvent être maintenus constants, le réglage réalisant les courants variables portant alors uniquement sur les débits évacués (par des déversoirs ou des orifices en charge).

Remarquons que la technique mise en œuvre (envoi ou appel de débits, autrement dit : réalisation de *sources* et de *puits*) est la même pour

réaliser un niveau donné ou un courant donné : il s'agit en fait de deux modalités différentes dans la mise au point du réglage des débits de ces sources ou puits. Pratiquement, ce réglage étant réalisé, on doit contrôler que *niveaux* et *courants* sont, ensemble, correctement reproduits.

M. GRESLOU décrit et compare le réglage *a posteriori* des courants dans un modèle (La Rance) où, lors de la construction et en raison de la localisation des problèmes qui furent seuls étudiés dans les débuts, le champ des courants vers la frontière du large était très différent du champ observé dans la nature, — et le réglage *a priori* dans un autre cas (La Seine), où, dès la conception du modèle, furent prévues 17 cellules d'alimentation en débit réglable réparties le long de la limite du côté mer.

Le réglage des courants, ou plus précisément le réglage du modèle contrôlé par l'observation du champ des courants, ne se limite pas pratiquement à la frontière mais concerne aussi toute l'étendue du domaine où, en agissant sur la rugosité du modèle (ou même éventuellement, en disposant des puits et des sources dans l'intérieur du domaine) on peut chercher à représenter correctement l'action, dans la nature, de la *rugosité*, de la rotation de la Terre (accélération de *Coriolis*), ou à corriger certaines perturbations introduites éventuellement par la *distorsion* dont on a pu affecter les échelles du modèle.

ANNEXE C

ANALYSE DE LA COMMUNICATION

de MM. X. MICHON ET J. GODDET

(Rapport n° 3)

AMÉNAGEMENT DE L'ESTUAIRE DE LA RANCE.

MODÈLE RÉDUIT DE LA STATION D'ESSAIS DE SAINT-MALO/SAINT-SERVAN

Dans cette communication, les auteurs rendent compte de la conception, de l'exécution et de l'exploitation d'un modèle réduit, non distordu, à l'échelle du 1/150, représentant l'estuaire de la Rance, et construit par le Laboratoire National d'Hydraulique dans le port de Saint-Malo/Saint-Servan, à la demande de l'Electricité

de France (Service d'Etudes sur l'Utilisation des Marées). Par son échelle, ce modèle se situait entre le modèle distordu (échelle horizontale 1/500, échelle verticale 1/80) exploité depuis une dizaine d'années à Grenoble par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique et les modèles de détail à plus grande échelle (en particulier modèle

en canal construit et exploité pour l'étude des batardeaux de coupure). Une bonne liaison put être établie pour l'exploitation de ces divers modèles, l'un définissant par exemple les conditions aux limites qui devaient être adoptées pour un autre. Et, dans l'ensemble, une excellente cohérence des résultats des essais à diverses échelles fut constatée.

L'appareillage le plus moderne du Laboratoire fut utilisé dans ce modèle (appareil générateur L.N.H. du niveau de la marée permettant d'asservir le niveau en un point du modèle à une courbe tracée sur papier et représentant, par exemple, une séquence de soixante marées — limnigraphes à pointes vibrantes, utilisés soit isolément, soit par groupes de deux pour enregistrer avec précision des différences de niveaux — chronophotographie pour relever un champ de courants — micromoulinets ou pendules immergés pour explorer en détail soit la variation du courant avec l'immersion du point de mesure, soit des sautes rapides — distributeurs vibrants et bandes transporteuses pour figurer les installations de chantier venant déverser des enrochements à une cadence donnée).

L'étalonnage du modèle a consisté essentiellement à vérifier que, la loi de niveau observée étant reproduite à l'extrémité mer du modèle, les niveaux et courants dans l'ensemble du modèle se trouvaient corrects. En fait, les faibles tirants d'eau des écoulements à basse mer dans la partie amont de l'estuaire conduisaient à un phénomène laminaire représentant mal le phénomène turbulent de la nature : il y fut remédié par le creusement d'une rigole dans un secteur que ne concernait directement aucun des essais.

Jusqu'à maintenant, le modèle a été utilisé pour étudier le régime des courants au voisinage de l'usine et pour contrôler les programmes de conduite du chantier de construction prévus d'une part par l'Electricité de France, d'autre part par certains des entrepreneurs préparant une réponse à l'appel d'offres de l'E.D.F. Mais sa situation, sur les lieux mêmes du chantier, le destine à être un guide qui se tiendra constamment à la disposition tant du maître de l'œuvre que de l'entrepreneur pour la résolution, au fur et à mesure, de tous les problèmes que poseront le démarrage, la poursuite et l'achèvement de cet important chantier.

ANNEXE D

ANALYSE DE LA COMMUNICATION

DE MM. X. MICHON ET R. BONNEFILLE

(Rapport n° 4)

LA MARÉE DANS LA MANCHE

CONSTRUCTION ET RÉGLAGE D'UN MODÈLE RÉDUIT

Dans le but de définir les limites géographiques qu'il conviendra d'adopter pour un modèle destiné à l'étude du chantier de construction de l'usine marémotrice des îles Chausey, fut effectuée la construction préalable d'un modèle distordu à très petites échelles (1/500 en hauteur, 1/50.000 en plan) sur lequel on essaya de représenter la propagation de l'onde de marée dans l'ensemble de la Manche.

Ce modèle fut limité d'une part à l'ouverture de la Manche sur l'Océan (entre Finistère et Cornouaille), d'autre part au Pas-de-Calais. La marée est réalisée par un batteur vertical (du type « batteur de houle ») susceptible d'un mouvement horizontal de translation sinusoïdale. Initialement, un seul batteur réalisait la marée du côté Atlantique. Pour améliorer la représentation de l'onde dans l'ensemble de la Manche (mais plus particulièrement en Manche orientale), un deuxième batteur, synchronisé avec le premier (compte tenu d'un déphasage à régler) fut mis en fonctionnement du côté mer du Nord.

Le réglage de la condition aux limites du côté

Atlantique ne put pas être effectué à l'image de la nature. Plus précisément, la différence importante des marnages entre Devonport et Morlaix (presque du simple au double) ne put être réalisée sur le modèle, tout au moins par l'emploi des divers procédés ou artifices mis en œuvre jusqu'à maintenant. L'hypothèse la plus vraisemblable est que, compte tenu des dimensions de l'aire géographique représentée, l'incidence de l'accélération de Coriolis, pratiquement nulle à l'échelle du modèle, joue par contre un rôle essentiel dans la propagation de la marée naturelle en Manche.

Dans ces conditions, le principe de l'étalonnage du modèle en *rugosité* fut perturbé : du fait de la non-réalisation d'une condition correcte à la limite, il devenait illusoire de se guider sur les écarts entre marée observée et marée représentée. Un biais fut trouvé faisant appel à un *point de vue énergétique* : on reproduisit, pour chaque zone du modèle, une loi de correspondance, entre énergie dissipée et vitesse maximale de flot, image de la loi naturelle.

Le résultat pratique du réglage obtenu fut une

représentation correcte des marnages, sinon dans l'ensemble du modèle (puisque dès la limite atlantique cette représentation n'était pas assurée), du moins dans le golfe de Saint-Malo, et même pratiquement tout le long de la côte bretonne et tout le long de la côte normande.

Parmi les essais effectués sur ce modèle, un

balayage systématique des diverses périodes à donner au mouvement des batteurs n'a mis en évidence des résonances que pour des périodes extérieures à l'intervalle (16 s, 44 s), donc nettement distinctes de la période de 20 s représentant la marée naturelle.

ANNEXE E

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. A. PELTIER

(Rapport n° 9)

INTÉGRATION DE L'ÉQUATION AUX DÉRIVÉES PARTIELLES

$$\frac{d^2Z}{dx^2} + \frac{d^2Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0$$

PAR UNE MÉTHODE D'ANALOGIE ÉLECTRIQUE

A l'équation aux dérivées partielles on substitue l'équation correspondante *aux différences finies*, après avoir fait choix d'un intervalle élémentaire suffisamment petit pour que l'on puisse valablement, d'une part schématiser la fonction cherchée par ses valeurs aux nœuds d'un quadrillage construit à partir de l'intervalle élémentaire, et d'autre part schématiser la frontière par un tracé empruntant exclusivement les côtés de ce quadrillage. On obtient ainsi pour chaque *point intérieur* une équation linéaire déduite de l'équation aux dérivées partielles du second ordre; de même, l'équation entière ou aux dérivées partielles du premier ordre qui traduit les conditions aux limites engendre une équation linéaire pour chaque *point frontière*. La détermination de la fonction en tous ces points (intérieurs et frontières) est ainsi définie par autant d'équations que d'inconnues.

Si on représente le quadrillage par un réseau maillé de résistances, en chaque nœud la loi de Kirchhoff s'exprimera par une relation linéaire entre le potentiel de ce nœud et les potentiels des nœuds voisins. En établissant de plus une connexion complémentaire reliant par une résistance chaque nœud à un potentiel fixe,

il est possible de donner à cette relation la forme non pas (c'est regrettable!) de l'équation aux différences finies relative au point correspondant, mais d'une *formule d'itération* équivalente. Plus précisément, la fonction Z étant complexe, la partie réelle d'une part, le coefficient de j d'autre part, de la valeur représentant la $(n+1)^{\text{e}}$ itération, se liront successivement en mesurant le potentiel en chaque point du réseau après mise en place de résistances dépendant des valeurs attribuées à z par la n^{e} itération. Sans qu'elle ait été rigoureusement démontrée, la convergence du processus (assez rapide d'ailleurs) fut constatée expérimentalement.

L'équation :

$$\frac{d^2Z}{dx^2} + \frac{d^2Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0$$

a été formulée pour résoudre un problème de détermination d'onde de marée. La méthode d'analogie employée par M. A. PELTIER fut une tentative de généralisation de la méthode utilisée par le C.N.R.S. pour la détermination des fonctions harmoniques [intégration de l'équation de Laplace : $(d^2Z/dx^2) + (d^2Z/dy^2) = 0$].

ANNEXE F

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. J. CARTERON

(Rapport n° 8)

UTILISATION D'UN CALCULATEUR ÉLECTRONIQUE POUR L'INTÉGRATION NUMÉRIQUE
DE L'ÉQUATION AUX DÉRIVÉES PARTIELLES

$$\frac{d^2Z}{dx^2} + \frac{d^2Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0$$

Comme dans la méthode analogique d'intégration de cette équation (voir Annexe E), on substitue au problème celui de la résolution d'un ensemble d'équations linéaires en nombre égal à celui des nœuds (nœuds intérieurs et nœuds frontières) d'un quadrillage, en chacun desquels on se propose de définir la fonction complexe Z .

On pourrait songer à la résolution *directe* de ce système linéaire (inversion matricielle); mais la méthode ne serait pas avantageuse, l'ordre élevé du système conduisant à un calcul lourd qui serait à reprendre fréquemment, en fonction des modifications apportées au quadrillage (dimensions du carré élémentaire — limites géographiques). Par contre, un calcul par *itérations* — dérivé de la méthode de *relaxation*, dont il diffère par la substitution d'un balayage séquentiel (plus aisé à automatiser) au balayage sélectif (procédant par ordre de résidus décroissants) — présente plusieurs avantages : en particulier le processus est *autocorrecteur*.

M. CARTERON expose comment il a dû programmer le problème avec la calculatrice dont il disposait, très rapide, certes, mais d'une capacité restreinte en mémoires. Il dut se borner à stocker provisoirement dans les 24 mémoires disponibles *une seule ligne* de l'itération en cours (ce qui limite à 24 colonnes l'extension du tableau de

calculs, mais n'en limite pas le nombre des lignes). Chaque itération se traduit par la perforation d'un ensemble de cartes, à partir desquelles (après tri et interclassement) sont perforées les cartes traduisant l'itération suivante. Avec une machine de plus grande capacité, la nécessité d'un balayage rigoureusement séquentiel ne s'imposera plus obligatoirement, et l'on pourra se rapprocher de la méthode de relaxation en effectuant, par exemple, un balayage limité aux points où le résidu sera supérieur au résidu moyen, ce qui permettrait d'améliorer la convergence, extrêmement lente avec la programmation actuelle (200 itérations pour un réseau de 200 nœuds et une précision de l'ordre de 1 ‰!). Provisoirement, l'auteur a pu cependant accélérer cette convergence (et réduire de 200 à 100 le nombre d'itérations nécessaires) par un artifice de « surcorrection » (consistant à extrapoler la variation des valeurs provisoires de la fonction entre deux itérations, consécutives ou non).

Pratiquement (et bien qu'il n'y ait pas identité entre les formules d'itération relatives à l'une et à l'autre méthodes) les résultats des calculs effectués indépendamment par la méthode analogique (M. A. PELTIER, voir Annexe E) et par la méthode arithmétique (M. J. CARTERON) se sont trouvés en parfait accord.

ANNEXE G

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. G. COHEN DE LARA

(Rapport n° 7)

ÉTUDE DE L'INFILTRATION DANS LES DIGUES EN ENROCHEMENTS.
APPLICATION AU CAS DES BATARDEAUX DE COUPURE

Si, dans une *digue en terre*, l'écoulement de filtration est toujours pratiquement *laminaire* et suit assez bien les formules donnant le débit en fonction des charges amont et aval déduites de la loi de Darcy, il n'en est plus de même dans une *digue en enrochements* (matériaux d'encombrement unitaire supérieur à 1 cm) où l'écoulement devient *turbulent* avec une perte de charge sensiblement proportionnelle au carré de la vi-

tesse. Or, la connaissance des lois de la filtration, aussi bien en régime turbulent qu'en régime laminaire et dans les régimes de transition, est indispensable pour exécuter et interpréter convenablement les essais de digues en enrochements sur modèle réduit, car, dans la généralité des cas, si l'écoulement est turbulent dans la nature, il est par contre laminaire à l'échelle du modèle. Etablissant (sur la base d'une perte de

charge variant comme le carré de la vitesse) une formule simple valable pour *matériaux roulés*, M. COHEN DE LARA la généralise au cas de *matériaux concassés* moyennant la détermination expérimentale d'un coefficient de forme (dans cette formule interviennent, outre ce coefficient de forme, le *diamètre nominal* du matériau et l'*indice de vide* du massif). L'auteur rend compte du travail expérimental par lequel il a contrôlé la validité des formules en déterminant le champ des vitesses d'un écoulement permanent dans une digue de section trapézoïdale, mettant en évidence, sur le parement aval, une *zone de suintement* dans la partie haute et une *zone d'eau morte* dans la partie basse.

Les conditions expérimentales furent poussées jusqu'à la détermination du seuil de stabilité des ouvrages. Là encore les lois valables pour les digues en terre ne le sont plus pour les digues en enrochements dans lesquelles la *cohésion est nulle* et l'*écoulement liquide, turbulent*. On mit ainsi en évidence, pour un massif donné, l'existence de trois valeurs critiques de la différence de charge, pour lesquelles apparaissent successi-

vement (lorsque la différence de charge croît constamment à partir d'une valeur initiale nulle) le phénomène de *suintement*, puis l'*entraînement de quelques enrochements* du parement aval qui se stabilisent à une cote plus basse avec formation d'une banquette relativement stable, et enfin des *éboulements importants*; au-delà de cette dernière valeur critique, il peut se créer un entraînement continu du matériau de la digue et la formation d'une brèche. Une protection efficace contre l'instabilité du parement aval consiste à le surcharger entièrement d'un matériau de très gros diamètre.

Pour rendre son expérimentation applicable à l'étude de la construction du batardeau de coupure d'un estuaire à marée, l'auteur a complété ses essais en régime permanent par des essais de stabilité sous une charge variable s'inversant périodiquement (et permutant ainsi les rôles des parements amont et aval) : il y a stabilité tant que la différence de charge critique définie pour un écoulement permanent n'est atteinte ni dans un sens ni dans l'autre.

ANNEXE H

ANALYSE DE LA COMMUNICATION

DE MM. J. LABETOULLE ET P. PEUTOT

(Rapport n° 5)

REPRÉSENTATION SIMULTANÉE, SUR UN MODÈLE A MARÉE, DES PHÉNOMÈNES DE CHARRIAGE ET DE SUSPENSION

En décrivant l'exemple précis des essais qu'ils ont été amenés à faire sur le modèle de la Gironde, les auteurs montrent comment, par des tâtonnements systématiquement conduits, ils ont pu de manière satisfaisante reproduire correctement à la fois l'*écoulement hydraulique* et les transports solides par *charriage* et par *suspension* tels qu'on les observe dans la nature.

L'étendue géographique à représenter conduisit à adopter une *distorsion voisine de 7*.

Une phase préliminaire a consisté en une étude sur modèle à fond fixe qui a permis, du seul point de vue hydraulique, d'éliminer cinq variantes d'ouvrages projetés sur les douze envisagées et de restreindre ainsi l'extension à donner aux phases ultérieures de l'étude sur fond mobile.

De la granulométrie des matériaux extraits sur place par dragage, granulométrie étendue mais où le sable est l'élément principal, il fut conclu que le mode de transport par charriage était prépondérant, et une première phase des essais sur fond mobile a consisté à négliger les débits solides de suspension devant ceux de charriage. Le matériau *plexiglas* (densité 1,18) fut choisi pour

réaliser un charriage pur, avec une granulométrie convenable pour reproduire : 1) la *rugosité* du fond fixe sur lequel avait été effectué un réglage correct de l'écoulement hydraulique; 2) les *régimes de stabilité du fond meuble* dans deux situations observées en Gironde (avant 1949: barrage de Macau à la cote - 2, stabilité des fonds; — après 1950 : barrage à la cote + 1,3, apport mensuel de 25.000 m³ de sable); et 3) une *échelle des temps de charriage* convenable, qui s'est trouvée égale au cinquième de l'échelle des temps d'écoulement (le modèle réalisait ainsi en une marée l'image des charriages produits par cinq marées dans la nature.)

Pour introduire dans une phase finale la figuration des transports par suspension, la recherche d'un matériau convenable à substituer au plexiglas fut effectuée *en canal* : le contrôle du choix de ce matériau consistait à vérifier que pour des courbes de dénivellation et de courants en canal reproduisant les conditions du modèle, on obtenait des courbes de concentrations de suspension figurant les relevés dans la nature. Cette condition ayant permis de définir la nature du

matériau (sciure de bois dur) et sa granulométrie (de 0 à 0,10 mm), la concentration à introduire dans le modèle fut choisie de manière à faire coïncider, par approximations successives, l'échelle des temps de sédimentation avec l'échelle des temps de charriage pour le même matériau, ce

qui fut réalisé pour une échelle commune des temps de transport solide (charriage et suspension) égale environ au septième de l'échelle des temps d'écoulement (le modèle réalisait en une marée l'image des transports effectués en sept marées dans la nature).

ANNEXE I

ANALYSE DE LA COMMUNICATION DE M. G. MAUBOUSSIN

(Rapport n° 1)

CONSTRUCTION DE L'USINE MARÉMOTRICE DE LA RANCE. CONTRIBUTION DES ESSAIS SUR MODÈLE RÉDUIT A LA MISE AU POINT D'UN MODE D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

L'auteur rappelle les caractéristiques du site à équiper et celles du projet d'équipement : estuaire dans lequel le jeu naturel de la marée renverse toutes les six heures un courant dont la valeur de pointe (mi-marée de vive-eau) correspond à un débit de remplissage ou de vidage de quelque 15.000 m³/s, marnage atteignant 13 m aux fortes marées; usine-barrage projetée longue de 800 m, fondée sur le rocher une douzaine de mètres au-dessous du niveau des plus basses mers, à l'intérieur de laquelle doivent trouver place une quarantaine de groupes turbines-alternateurs et une dizaine de puits de vannage. Il expose ensuite les dispositifs de chantier envisagés par l'Electricité de France, maître de l'œuvre, pour l'exécution des travaux, et proposés comme base d'étude aux entrepreneurs consultés.

Un type courant de batardeau est réalisé par battage dans une banquette en enrochements de deux rideaux de palplanches parallèles reliés par des tirants, entre lesquels on déverse ensuite du sable de remplissage. Le courant d'écoulement de la marée qui remplit ou vide l'estuaire au travers du débouché résiduel augmentant progressivement avec l'avancement des travaux, il arrive un stade où le type courant de batardeau n'est plus réalisable. La « coupure » est alors effectuée par déversements d'enrochements de plus en plus

gros (destinés à résister à l'entraînement par le courant). Mais la digue de coupure ainsi constituée est « perméable »; toutefois, si elle n'arrête pas le courant, elle le freine suffisamment pour permettre la mise en place d'une contre-digue en matériaux tout-venant, l'espace entre les deux digues étant ensuite rempli de sable et cailloux au travers desquels pourra être battu un rideau d'étanchéité.

La réalisation sur modèle de ce programme de chantier a permis d'en définir quantitativement toutes les caractéristiques : mode de protection des banquettes contre le courant après la construction des batardeaux; largeur de la brèche résiduelle à partir de laquelle devra être abandonné le type courant de batardeau; poids unitaire des blocs à déverser et cadence du déversement pour réaliser la coupure perméable; débit de filtration à prévoir au travers de la digue perméable seule, puis au travers de l'ensemble digue et contre-digue avant puis après remplissage de l'espace intermédiaire, etc.

Tous ces essais ont nécessité un certain nombre d'aller et retour entre les modèles aux diverses échelles (modèle distordu au 1/80 — 1/500 à Grenoble; modèle non distordu au 1/150 à Saint-Servan; modèles en canal, utilisés en particulier pour le contrôle des données numériques concernant la filtration).

NOTE SUR LE RÉGLAGE D'UN MODÈLE A MARÉE

La synthèse des diverses communications présentées aux Journées de l'Hydraulique de juin 1956 qui concernent le réglage d'un modèle réduit hydraulique devant figurer la marée dans un secteur limité, ainsi que de nombreux échanges de vues relatifs à la conception d'un modèle projeté comportant une très large frontière du côté mer (golfe de Saint-Malo - baie du Mont-Saint-Michel), m'ont amené à élargir la position du problème du réglage d'un modèle à marée.

Deux distinctions sont souvent imposées par la nature du problème, ou par l'habitude, qui ne doivent pas cependant avoir un caractère obligatoire. D'une part, aux conditions aux limites peuvent être substituées dans certains cas des conditions intérieures. D'autre part, réglage des niveaux et réglage des courants sont en corrélation étroite, et se réalisent généralement l'un et l'autre par la commande de certains débits de remplissage ou de vidage du modèle.

D'un point de vue global, on peut dire que n mesures $x_i(t)$ d'éléments variables dont la valeur théorique est $X_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) doivent définir l'asservissement de p éléments de réglage $y_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, p$).

Dans la pratique à laquelle nous sommes actuellement habitués, les y_j définissent toujours des prélèvements de débits (par volets déversants ou par vannes profondes, et les x_i représentent le plus souvent des niveaux, mais peuvent aussi figurer des différences de niveau ou des courants. Quand il s'agit de niveaux, le contrôle a lieu généralement sur la frontière ou au voisinage de la frontière du modèle; mais rien n'empêche de considérer des niveaux en des points intérieurs, sous réserve de les choisir dans des régions qui ne seront pas perturbées par les modifications du site qui font l'objet de l'étude sur modèle.

Habituellement aussi, un élément de réglage y_j est lié à un seul élément mesuré, si bien que $p = n$ et que l'on peut identifier i et j et écrire $y_i = F_i(x_i - X_i)$ F_i désignant une fonctionnelle (le plus souvent une combinaison linéaire intégral-différentielle). Mais, et ceci est surtout vrai pour un modèle dont la frontière du large est très développée, l'interaction de toutes les portions du modèle peut conduire à chercher à réaliser une correspondance plus complexe serrant de plus près le phénomène naturel à représenter, correspondance définissable symboliquement par une relation de la forme :

$$(y_1, y_2, y_p) = F(x_1 - X_1, x_2 - X_2, \dots, x_n - X_n)$$

Précisons bien que la présente Note ne résoud rien, mais indique la voie d'une généralisation qui peut permettre à d'habiles techniciens de surmonter certaines des difficultés rencontrées dans la pratique.

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 l'actualité du projet de la Rance donne une importance particulière à la question à l'ordre du jour. Le modèle est un outil de travail efficace non seulement pour les ingénieurs qui font le projet, mais également pour les entrepreneurs chargés de l'exécuter.

M. VANTROYS, rapporteur général, expose dans quel ordre il a classé les rapports; puis il présente un sommaire de son rapport général.

M. le Président avant d'ouvrir la discussion, souligne deux ordres de considération: d'une part la convergence des différents moyens que le raisonnement et l'expérience mettent à notre disposition (calculs abstraits des mathématiques, analogies avec d'autres phénomènes régis par des équations analogues, modèle réduit); d'autre part la façon dite des méthodes d'approche progressives (modèle préparant un modèle ultérieur, etc., jusqu'à atteindre la vraie grandeur).

M. SCHÖNFELD demande à M. PELTIER (rapport n° 5) s'il n'est pas nécessaire, comme le montrent les conditions aux limites, d'introduire aux points extérieurs du réseau un courant régi par les dérivées tangentielles du potentiel. Et, si ce point de vue est juste, comment l'a-t-on réalisé?

M. PELTIER répond que l'introduction de la condition $\partial z/\partial n = \alpha \partial z/\partial n + \beta$ n'a pas été réalisée par le montage analogique qui, tel qu'il est, permet d'imposer une valeur donnée à la dérivée normale $\partial z/\partial n$, mais non pas à la dérivée tangentielle $\partial z/\partial s$. Il a été cependant tenu compte de la condition dans le processus d'itération, en prenant $(\partial z/\partial n)_{n+1} = \alpha (\partial z/\partial n)_n + \beta$ la dérivée normale imposée lors de la $(n+1)^{\text{e}}$ itération se trouvant ainsi définie par la valeur de la dérivée tangentielle mesurée à la n^{e} itération.

(Après une interruption, la séance reprend Salle Iéna sous la présidence de M. VANTROYS.)

M. FRANÇOIS (Alger) croit utile de signaler des travaux analogues effectués par M. DURAND, doyen de la Faculté des Sciences de Toulouse, avec, comme objectif principal, le calcul très précis de champs électro-magnétiques et électro-statiques (cas, par exemple, des lentilles électroniques).

L'itération à partir des valeurs frontières était conduite de préférence aux réseaux quadrillés de maille convenable. Dans une conférence faite à Alger, M. DURAND avait indiqué que son équipe de Toulouse ne disposait que d'une calculatrice électro-mécanique. Mais dans nombre de cas, des « blocs » d'itération avaient pu être mis en place pour réduire matériellement le travail, sur des systèmes présentant des analogies de forme, ou d'autres similitudes de caractéristiques. M. DURAND qui ignorait sans doute les travaux de M. CARTERON, avait cependant souligné l'extension évidente du processus à bien d'autres problèmes, y compris ceux des fluides en mouvement.

M. FRANÇOIS regrette de devoir se borner à ces indications sommaires de simple mémoire, mais il donnera ultérieurement pour le compte rendu, les précisions et références qu'il pourra obtenir (1).

M. CARTERON ajoute que la convergence de la méthode

décrite dans son rapport n° 6 n'est pas assurée dans tous les cas. Elle dépend des valeurs propres de la matrice des coefficients du système d'équations et il a constaté des divergences avec certaines conditions aux limites. C'est la raison pour laquelle il a dû mettre au point un autre programme utilisant la méthode dite « des projections perpendiculaires », car elle consiste à itérer en projetant le point représentatif des coordonnées $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$ dans l'espace à n dimensions perpendiculairement sur les hyperboles successives admettant pour équations les équations à résoudre. La convergence est assurée cette fois dans tous les cas, même en espèce complexe.

Par contre, les calculs sont notablement allongés, car il faut ajouter à l'évaluation du résidu le calcul des nouvelles coordonnées après projection. Or, la projection altère toutes les coordonnées de coefficients non nuls dans l'équation traitée.

Il est malheureusement trop tôt actuellement pour donner des résultats concrets sur l'emploi de cette nouvelle méthode.

M. VANTROYS remercie M. CARTERON et souligne l'importance de sa remarque. En effet s'il est relativement facile d'imaginer une méthode d'approximation successive, on manque le plus souvent d'un critère pratique pour s'assurer de la convergence. Le principe d'une méthode donnant à coup sûr la convergence vers sa solution présente un très grand intérêt. D'ailleurs le problème étant l'étude d'une réalité physique, la solution existe sûrement; mais pour la trouver il importe d'éviter l'emploi d'un processus susceptible d'introduire une divergence.

M. STERLING rappelle que MM. CARTERON et PELTIER ont supposé dans leurs rapports une marée sinusoïdale. La présence de l'usine fait apparaître un changement de l'amplitude et de la phase. Si on avait considéré la courbe de marée réelle on aurait pu chercher à estimer la déformation de celle-ci. L'avancement de l'heure de marée haute peut en effet avoir une grande importance dans le problème du débit solide.

M. VANTROYS répond que, dans son principe, l'objection n'a pas échappé, mais que pour éviter de se lancer d'emblée dans de trop grandes complexités, on a cherché à obtenir un premier résultat sous une forme schématique commode, laquelle est sinusoïdale. Il se trouve que, dans le secteur qui nous intéresse (Baie de Saint-Malo) la marée n'est pas très éloignée d'être sinusoïdale.

À la suite de la remarque de M. STERLING, M. SURREL signale qu'ayant examiné la forme des marées réelles sur les enregistrements du marégraphe de Saint-Servan il en est arrivé à la conclusion que la phase du montant (durée 5 h. 30) pouvait être représentée, avec une très bonne approximation, par une demi-sinusoïde de période 11 heures et la phase du perdant (durée 7 h) par une demi-sinusoïde de période 14 h. Dans ce dernier cas l'approximation est un peu moins bonne (de l'ordre de 5 %). Etant donné le faible temps de réponse de l'estuaire de la Rance, il est d'avis que le phénomène peut être bien représenté par la succession d'une marée montante de période 11 h et d'une marée descendante de période 14 h. Pour de grandes étendues comme celle de la baie du Mont Saint-Michel il y aurait lieu d'examiner le problème de plus près. Il rappelle que M. DIEULOUF a donné chez Neyrpic une représentation correcte de la

(1) Cf. effectivement *Bulletin de la Société des Sciences de l'Afrique du Nord*, n° 7-8 de mars-juin 1956, pages 20 à 24.

marée naturelle par un bon développement en termes sinusoïdaux.

M. VANTROYS déclare que si les amplitudes ne concordent pas, il sera évidemment difficile de raccorder l'une à l'autre les deux courbes, montant et perdant (la période de la marée intervenant sur les amplitudes). La méthode actuelle (avec la schématisation sinusoïdale) constitue une première approximation que les progrès futurs dans la technique des calculatrices permettra de dépasser en rendant possible la multiplication des calculs que nécessiterait la décomposition de chaque onde en plusieurs composantes sinusoïdales.

M. STERLING ajoute que si l'on suppose que la marée est sinusoïdale les perturbations sont affaiblies. M. HANSEN a fait des calculs à l'aide de machines électroniques en prenant une courbe réelle. Les calculs sont longs mais les machines électroniques telles que les I.B.M. 701 permettent de les faire dans des délais raisonnables. Ces travaux de M. Walter HANSEN ne sont pas encore publiés.

M. SCHÖNFELD signale qu'aux Pays-Bas, pour l'étude des marées et tempêtes de la mer du Nord, c'est-à-dire des phénomènes non périodiques, on cherche à réaliser un modèle à analogie électrique de cette mer, en ajoutant à un réseau électrique correctement dimensionné, des capacités, des selfs, des résistances et des éléments non réciproques du type « gyrator », ainsi que le définit l'électrotechnicien hollandais TELLEGEN.

M. VANTROYS remercie M. SCHÖNFELD et signale qu'il avait cherché avec M. PELTIER une solution analogique du problème qui aurait évité des approximations successives à l'aide d'un réseau comportant des résistances négatives, mais si de telles résistances sont réalisables schématiquement sur le papier, leur mise en œuvre pratique est prohibitive.

M. GRESLOU déclare à propos de son rapport n° 2 que les réglages des courants et du niveau sur un modèle à marée ne sont pas indépendants comme pourrait le laisser supposer le début de son rapport, et, contrairement à ce que semble dire M. VANTROYS dans sa note additive, on ne dispose pas en général d'un seul élément de réglage : niveau ou courant, mais de données sur les courants au large et de données sur les niveaux tout le long de la rivière. M. GRESLOU poursuit son argumentation en reprenant les idées exposées dans son rapport, sur la difficulté de reproduire certains spectres de courant complexes à partir des niveaux, sur le ré-

glage de la rugosité et sur l'effet de la distorsion du modèle sur les courants secondaires. M. VANTROYS insiste sur la distinction à faire entre les éléments de réglages permanents (reproduction « *ne varietur* » de la profondeur, de la rugosité, etc...) et les éléments de réglage oscillants, qui suivent le rythme de la marée à reproduire (commandes de débits asservies à des mesures de niveaux, de courants, etc...).

A la suite de l'intervention de M. GRESLOU sur la note complémentaire de M. VANTROYS et à propos du Rapport n° 3 de M. MICHON et M. GODDET sur le réglage du modèle de Saint-Servan, M. SURREL signale qu'il a été frappé par la relative insensibilité de la propagation de l'onde marée (amplitude et phase) vis-à-vis du paramètre « rugosité ». Il précise qu'il s'agit du phénomène principal, les phénomènes annexes à faible énergie (tourbillons, zones d'eau morte) pouvant être, eux, notablement affectés. Cette insensibilité a été observée lors des tentatives de réglage du modèle du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (L.D.H.); elle s'est manifestée également pour un réglage du modèle de Saint-Malo (Laboratoire National d'Hydraulique). Il demande aux auteurs s'ils n'en verraient pas l'explication dans la faible valeur relative de la dissipation d'énergie de la marée dans cet estuaire. Au point de vue analogie électrique, l'estuaire de la Rance se comporte comme un condensateur à angle de fuite faible, et l'énergie dans l'estuaire a un caractère très fortement réactif. La composante wattée ayant une importance relativement faible, l'influence de la rugosité, dans la nature, serait donc relativement faible. Cette remarque ne s'applique pas à d'autres modèles où le rapport de l'énergie active et réactive aurait des valeurs notablement différentes.

En réponse à M. SURREL, M. LE MENESTREL fait remarquer que si ce qui vient d'être dit est vrai pour l'estuaire, cela n'est plus vrai pour la partie mer du modèle L.D.H. Pour l'estuaire la propagation de l'onde de marée serait surtout régie par les formes des rives et non par le fond; au contraire, en mer, l'effet des côtes devient négligeable vis-à-vis des frottements sur le fond.

Au sujet de la propagation, M. BONNEFILLE ajoute que d'après le modèle du Laboratoire National d'Hydraulique, la rugosité joue simplement sur l'amplitude de l'onde et sur les courants; par contre, il ne pense pas qu'elle puisse être négligeable à l'intérieur de la Rance.

Il semble difficile, à M. GODDET, d'admettre que la rugosité joue un rôle sur les pertes de charge dans la Manche, et qu'elle a relativement moins d'influence sur la propagation de la marée dans la Rance, où l'on a, du fait des rétrécissements successifs, des maxima de courants importants. Il est plus vraisemblable d'admettre que l'influence de la rugosité est masquée par celle des pertes de charge à la Borda, qui paraissent relativement plus importantes.

M. VOYER rappelle que, dans son article, M. GIBRAT donne 60.000 kW comme puissance moyenne dissipée en Rance sur une puissance passante totale de l'ordre de 800.000 kW.

M. MICHON signale les améliorations et modifications considérables obtenues sur les formes et amplitudes des enregistrements de marée sur les modèles de la Loire, de la Gironde et de la Manche au Laboratoire National d'Hydraulique, par la mise en place de la rugosité.

Au sujet du rapport n° 4 de MM. MICHON et BONNEFILLE, M. DIEULOT remarque une possibilité d'erreur dans l'interprétation des essais faits sur le modèle de la Manche à Chatou au sujet de la variation des périodes de la marée et il demande des précisions à M. MICHON.

Ces précisions font l'objet d'un exposé complémentaire de M. MICHON, qui a été ajouté à l'édition définitive de son rapport dans l'ouvrage « Les énergies de la mer ».

M. GRESLOU demande si la propagation de l'onde marée sur le modèle représentait de façon correcte le passage des mers simultanément sur les côtes françaises et anglaises, car lorsque au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique on essaya il y a quelques années de représenter graphiquement cette propagation de la marée en Manche par une épure analogue aux épures de houle, pour un passage correct de l'onde marée le long de la côte française, on observa un décalage le long de la côte anglaise.

M. BONNEFILLE répond que si l'on considère l'ensemble de la Manche orientale prise isolément, son étalonnage est correct, mais le coefficient de marée correspondant est inférieur de 15 % à celui de la partie sud de la Manche occidentale.

M. VANTROYS indique que ceci expliquerait la divergence constatée entre l'heure réelle de la marée à Portsmouth et celle qui résulte du modèle car la marée à Portsmouth résulte de la superposition d'une marée de Manche occidentale mal réalisée, à la marée à peu près correctement réalisée de la Manche orientale, d'où une divergence en forme et en horaire.

M. BONNEFILLE fait remarquer que plus on ajoute de la rugosité sur le modèle de la Manche, meilleures sont les formes de marées représentées.

M. DIEULOT insiste sur l'imperfection des mesures non répétées dans la nature et n'accorde pas beaucoup de valeur de ce fait aux discussions sur les bilans énergétiques.

M. MICHON remarque que lorsqu'on parle de précision d'un modèle, c'est uniquement pour lui et non par rapport à la nature.

Avec quelques exemples il attire l'attention sur l'importance qu'il y a, dans l'utilisation ou l'interprétation des chiffres précisant les données naturelles, à ne jamais perdre de vue : la « définition » du phénomène, c'est-à-dire la précision avec laquelle dans la nature il se reproduit semblable à lui-même, la précision des mesures originales et la valeur des transformations effectuées sur ces mesures pour aboutir aux données de base.

Il est plus aisé d'effectuer plusieurs mesures successives dans les mêmes conditions sur un modèle que dans la nature. Pour des mesures identiques de marées à Saint-Malo, on trouvait des écarts dans la partie amont de la Rance (écluse du Chatelier) de l'ordre de 30 à 40 cm d'amplitude.

M. VANTROYS précise la portée de la remarque de M. DIEULOT : si les courants dans la Manche ne sont

pas connus à mieux qu'un chiffre significatif, par contre les mesures de niveau sur les deux rives ont fait l'objet d'un plus grand nombre de mesures plus précises.

Puis on passe à la discussion du rapport n° 8 de MM. LABETOUILLE et PEUTOT. M. LHERMITTE leur demande deux précisions : sur la difficulté d'employer, pour représenter le matériau solide transporté, de la sciure de bois qui n'est pas très chère, mais qui représente, d'après un article de *la Houille Blanche* 1954, de très graves difficultés hydrauliques qui tiennent surtout à la texture du matériau, et, si on a le droit de distordre arbitrairement la concentration sans risquer de compromettre la fidélité du modèle.

M. PEUTOT répond que la sciure de bois a été utilisée pour les essais de suspension parce que, seul, ce matériau donnait des courbes de concentration correctes.

M. GRESLOU tient à préciser que, sous réserve de traitement décrit dans l'article de *La Houille Blanche* pour éviter sa putréfaction, la sciure a été employée sur le modèle de la Seine pendant 5 ans, jour et nuit, et elle s'est révélée excellente pour reproduire les phénomènes d'évolution de l'estuaire, comme l'ont prouvé les essais d'historique dont M. GABRIEL a parlé au cours d'une séance précédente; toutefois, son extrême légèreté paraît exclure son emploi dans les cas de reproduction des phénomènes de transport par la houle comportant un déferlement.

Pour l'autre question de M. LHERMITTE, il s'étonne à son tour que l'on puisse choisir des concentrations différentes afin de réduire l'échelle des temps. Il pense qu'il vaut mieux utiliser dans ce but d'autres artifices, comme de schématiser la reproduction des facteurs naturels. Par exemple sur le modèle précité de la Seine, on a pu, après vérification préalable de la validité de cette simplification, ne représenter qu'un coefficient de marée de vive eau et un seul débit de crue, ce qui a considérablement raccourci ces essais. On avait une échelle des temps qui donnait 9 heures au modèle pour 2 années dans la nature.

M. PEUTOT déclare que la distorsion de la concentration est obligatoire si on essaye de représenter les deux phénomènes charriage et suspension sur un même modèle car l'échelle des temps de charriage est fixée et celle des temps de sédimentation doit être la même.

M. LHERMITTE, lui, pense que la granulométrie devrait permettre de rectifier l'échelle.

La séance est levée à 18 heures.

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