Énergie mécanique de la marée : État dans la nature

Mechanical energy of tides : State in nature

PAR

A. GOUGENHEIM

INGÉNIEUR HYDROGRAPHE GÉNÉRAL

1.

Les Océans, avec leur superficie de 360 millions de kilomètres carrés, leur profondeur moyenne de 3.800 mètres, leur masse de 140 millions de milliards de tonnes, qui n'est seulement d'ailleurs que le 1/42.000 de la masse terrestre, sont susceptibles d'emmagasiner des quantités énormes d'énergie dont l'existence est témoignée par les mouvements dont ils sont le siège.

Ces mouvements peuvent avoir un caractère oscillatoire comme la houle et les marées; la première, causée par les vents, intéresse seulement la couche superficielle des océans, tandis que les marées, imposées par les sollicitations des astres, sont des ondes de masse qui animent toute l'épaisseur de l'hydrosphère. Mais il existe aussi des mouvements apériodiques comme les grands systèmes de courants qui entraînent les eaux voisines de la surface dans une ample et complexe circulation giratoire, ces courants sont dus à l'action des vents transmise par viscosité dans l'intérieur du fluide, ou aux hétérogénéités de densité résultant de causes multiples telles que l'échauffement, l'évaporation, les précipitations atmosphériques, les apports des fleuves, la fonte des glaciers, etc.

Les études consacrées jusqu'à présent à ces phénomènes ont eu généralement pour objet le développement de leur connaissance et leur explication. Mais les progrès rapides de notre civilisation se manifestent par des besoins toujours croissants d'énergie; on n'hésite plus à la chercher au cœur même de l'atome où elle est infiniment condensée et l'on envisage aussi bien de l'emprunter aux phénomènes naturels, au sein desquels elle est pourtant extrêmement diluée. Les IV^{es} Journées de l'Hydraulique

consacrées aux énergies de la mer manifestent cette seconde tendance; les géophysiciens ne sont plus à peu près les seuls à s'intéresser aux mouvements de la mer, une vaste cohorte d'ingénieurs en aborde aussi l'étude avec un esprit différent et des préoccupations nouvelles. La présente manifestation, dans laquelle les seconds ont été plus spécialement conviés à nous faire connaître leurs premiers résultats, offre donc un intérêt considérable, mais la grande variété des sujets a rendu nécessaire leur division en plusieurs rubriques.

Nous ne nous occuperons donc ici que de l'énergie des marées telle qu'elle se rencontre à l'état naturel. De nombreuses communications nous sont parvenues sur le sujet, ou dans un rapport plus ou moins lâche avec lui.

2.

Citons en premier lieu un mémoire de M. VANTROYS sur la *nature de l'énergie des marées*. Pour établir que cette énergie est empruntée à la force vive de la rotation de la Terre, l'auteur utilise ingénieusement une analogie électrique et compare la rotation du globe terrestre dans le champ perturbateur luni-solaire au mouvement du rotor d'un alternateur dans le champ du stator. Si cette comparaison est très suggestive, notamment pour des ingénieurs plus familiarisés avec les phénomènes électriques qu'avec les problèmes de mécanique céleste et de mécanique des fluides, certaines précautions sont cependant à prendre, en raison par exemple de la différence entre les lois de propagation de l'électricité et celles qui régissent la propagation des ondes de gravité. D'autre part le montage des circuits s'écarte des concepts habituels, il n'existe

pas de circuit extérieur, le bobinage du rotor est fermé sur lui-même, les lignes de transport et les consommateurs d'énergie sont fixés sur le rotor et participent à son mouvement. D'ailleurs seules les mers littorales peuvent être assimilées à des câbles électriques, les océans se présentant comme des plaques conductrices dans lesquelles la propagation des courants est très complexe.

Cette distinction entre mers littorales et océans s'impose encore plus lorsqu'on veut étudier la génération et la circulation de l'énergie. Dans les océans, vastes et profonds, le travail effectué par le potentiel luni-solaire est appréciable, mais les dénivellations et les élongations correspondantes sont faibles, les déplacements restent lents et les résistances passives ont un effet négligeable. C'est le contraire dans les mers littorales où l'action directe du potentiel générateur est négligeable, les marées y sont des ondes dérivées des marées océaniques; en raison des faibles profondeurs les déplacements horizontaux et verticaux, ainsi que les vitesses, prennent des valeurs appréciables; il en est de même de l'effet des frottements et de la viscosité. Dans l'analogie électrique, les océans sont donc le bobinage actif du rotor, sans résistance ohmique interne, tandis que les mers littorales correspondent aux lignes de transport, pourvues d'une résistance ohmique et connectées aux bornes de l'océan générateur; la puissance qu'elles transportent est consommée à peu près complètement. En outre le temps de relaxation pour les mers littorales n'est que de quelques jours et il impose sa valeur à l'ensemble des marées du globe. Le principal intérêt de cette remarque de M. VANTROYS, qui la justifie d'ailleurs dans un calcul donné en annexe, est de redresser une conclusion un peu hâtive d'Henri POINCARÉ, d'où découlait pour les marées de l'hydrosphère une part trop faible dans le ralentissement de la rotation terrestre.

3.

Une autre communication d'ordre très général est présentée par M. EYRIÈS. Beaucoup plus classique et ne concernant d'ailleurs pas directement l'énergie des marées, elle est consacrée aux *bases théoriques du problème des marées océaniques*. Ce problème dépasse de beaucoup la simple prédiction de marées par extrapolation d'observations préalables; il se propose en effet de déterminer *a priori* le comportement des marées dans les océans réels. C'est un problème général d'hydrodynamique dans lequel on connaît à tout instant le module et la direction des forces extérieures, ainsi que les conditions aux limites. Pour pouvoir le résoudre, il est nécessaire de recourir à des hypothèses simplificatrices, parfaitement légitimes; on admet que l'on a affaire à un fluide de densité uniforme dénué

de viscosité, on néglige en outre les accélérations verticales et le carré des vitesses, cette dernière hypothèse revenant à admettre que les oscillations de la marée sont petites.

M. EYRIÈS expose les solutions actuellement connues. Particulièrement simples lorsqu'on considère des domaines de faible étendue (canal rectangulaire ou bassin circulaire), elles ont pu être également obtenues dans le cas de bassins schématiques se rapprochant beaucoup plus des océans réels, tels que globe entièrement couvert d'eau, océan limité par des parallèles et enfin, plus récemment, océan bordé par des méridiens. Il existe bien une solution absolument générale de l'équation des marées, qui a été donnée par Henri POINCARÉ, mais elle conduit à des calculs tout à fait inextricables lorsqu'on veut l'appliquer à des océans réels et aucun essai n'a encore été poursuivi.

La difficulté principale du problème réside dans le choix de la forme mathématique appropriée qu'il convient de donner à la loi de profondeur. En particulier les cas schématiques d'océans limités par des méridiens et ayant une profondeur constante conduisent à des comportements très divers des résultats lorsqu'on fait varier la profondeur constante adoptée; il est par suite impossible d'en tirer des conclusions pour les océans réels, bien que ce soient ces schémas qui soient les plus voisins de la réalité.

4.

Avec le mémoire de M. ALLARD, nous quittons les domaines pélagiques pour les eaux peu profondes et toutes les communications suivantes s'y rapporteront aussi. Cela n'a rien d'inattendu, car les marées océaniques sont pratiquement inaccessibles aux mesures en raison de l'absence de points de repère fixes au voisinage de la surface de l'eau. On ne possède donc de connaissance précise du phénomène que dans les eaux littorales et celles-ci se prêtent seules à des études concrètes sur les marées.

Le travail de M. ALLARD est d'ordre mathématique. On sait que lorsque l'on étudie la propagation de la marée dans un canal on peut intégrer par la méthode des caractéristiques les équations aux dérivées partielles définissant le mouvement.

Henri POINCARÉ est le premier à avoir appliqué au problème des marées fluviales la méthode d'intégration par les caractéristiques. Cette méthode a été reprise et développée depuis par divers auteurs, notamment par Marc HENRY, par STOKER et très récemment par M. C.J. SCHÖNFELD qui en a fait dans sa thèse de doctorat une étude très complète apte à résoudre effectivement divers problèmes d'ordre pratique.

M. ALLARD a cherché à généraliser l'application de cette méthode aux marées d'un domaine à deux dimensions dans lequel apparaissent les effets de l'accélération de Coriolis. Après avoir établi les équations aux dérivées partielles du mouvement, il montre qu'il existe deux familles de surfaces caractéristiques sur lesquelles se propagent les discontinuités des dérivées de la vitesse et de la dénivellation. Mais le procédé d'intégration ne permet plus de ramener le problème à des quadratures, il conduit seulement à une relation différentielle contenant une variable de moins que le système initial. Le retour au cas simple du canal fournit une vérification des résultats établis.

Si le travail de M. ALLARD, qui est d'une belle tenue mathématique, n'est pas susceptible directement d'application pratique, il n'en ouvre pas moins la voie à des recherches ultérieures sur la structure et les propriétés de l'onde marée.

5.

L'exposé de M. SCHÖNFELD sur la *circulation de l'énergie des marées dans les mers littorales* est également une recherche théorique, mais qui, elle, se situe exactement dans la rubrique dont nous nous occupons.

S'appuyant sur l'analogie qui existe entre les phénomènes électriques et les phénomènes hydrauliques, l'auteur a étendu aux marées les notions de puissance résistive et de puissance réactive, en les adaptant évidemment aux deux aspects du problème, existence de l'accélération de Coriolis et extension bi-dimensionnelle du champ de mouvement. En outre les marées sont considérées comme des ondes sinusoïdales simples.

M. SCHÖNFELD arrive alors à deux équations aux dérivées partielles qui représentent séparément la circulation pulsative et la circulation alternative de l'énergie.

Dans le cas d'une région limitée, on peut intégrer ces équations ainsi que celles du mouvement. On obtient ainsi une formule de continuité reliant la marée à l'intérieur du domaine et le débit sur son contour; on trouve également deux équations exprimant le bilan de la quantité de mouvement dans la région considérée, mais comme elles font intervenir le coefficient de Chézy, généralement mal connu, elles ne sont utiles que dans les régions où le frottement est faible, c'est-à-dire où la profondeur est grande et où les vitesses sont petites. Enfin on établit deux équations d'énergie, dont une seule dépend du coefficient de Chézy; ces équations d'énergie ne sont pas indépendantes des équations dynamiques précédentes et peuvent, le cas échéant, leur être substituées.

L'auteur a appliqué les résultats de son étude aux marées de vive-eau moyenne dans la

Manche. L'énergie venant de l'Océan pénètre à l'ouest en régime pulsatif et se dissipe au fur et à mesure de la propagation, principalement dans la partie centrale où les courants sont forts. Une partie importante est dissipée dans le golfe de Saint-Malo, une faible partie pénètre en mer du Nord.

Dans la Manche occidentale, les énergies cinétique et potentielle s'équilibrent à peu près tandis qu'entre le Cotentin et l'Angleterre, région de forts courants et de marées relativement faibles, l'énergie est surtout accumulée sous forme cinétique, et que, dans le golfe de Saint-Malo, l'énergie potentielle est prépondérante, de même que dans la partie orientale de la Manche.

A ces résultats qualitatifs, M. SCHÖNFELD a joint un bilan chiffré de l'énergie des marées dans les diverses zones de la Manche. Les résultats s'accordent dans l'ensemble avec ceux qu'avait obtenus antérieurement M. ALLARD en 1951.

6.

Comme celui de M. SCHÖNFELD, le mémoire de M. BONNEFILLE a pour objet la *circulation de l'énergie dans les mers littorales*, mais alors que M. SCHÖNFELD s'est efforcé de distinguer la puissance résistive de la puissance réactive et a établi la théorie correspondante, le cas de la Manche n'étant qu'une simple illustration, M. BONNEFILLE a simplement repris pour cette mer, mais avec des données plus serrées, le calcul ancien par lequel M. ALLARD obtenait l'énergie transportée à l'aide des valeurs expérimentales de la dénivellation et du courant. Ayant opéré pour la vive-eau et la morte-eau moyenne, il obtient deux valeurs de la puissance moyenne consommée par frottement dans diverses régions et peut ainsi rechercher la relation entre la puissance consommée et la vitesse moyenne du courant.

M. BONNEFILLE a eu d'autre part une idée très ingénieuse pour interpréter la distribution de la puissance dans les mers littorales. Partant des cartes des lignes cotidales et confluentes de la marée de vive-eau moyenne dans la Manche, la mer du Nord et la mer d'Irlande, il a dressé la carte des lignes d'égal déphasage entre l'heure de la pleine mer en un point et l'heure du maximum de la vitesse du flot au même point. Comme on pouvait s'y attendre théoriquement, ces lignes d'égal décalage convergent vers les points amphidromiques et vers les points morts; en outre, à l'entrée de la Manche, le décalage est de sens opposé sur la côte anglaise et sur la côte française. Il existe donc en Manche occidentale une ligne où la marée est en phase avec le courant et sur laquelle l'onde-marée transporte par suite le maximum de puissance possible.

Enfin la distribution des puissances réactives

transitées et consommées ou produites, qui rappelle dans ses grandes lignes celle trouvée par M. SCHÖNFELD, lui permet d'admettre que la puissance réactive est consommée dans les régions nodales et qu'elle prend naissance dans certaines régions littorales assimilables à des capacités.

Dans une deuxième partie de son travail, M. BONNEFILLE montre qu'on pourrait obtenir l'effet du frottement en comparant la valeur expérimentale du rotationnel à celle qui correspond à la seule force de Coriolis, mais cette méthode ne paraît pouvoir conduire qu'à des résultats très incertains.

7.

Avec un second travail de M. VANTROYS consacré au régime des marées dans la Manche, nous abordons un problème différent, très particulier d'ailleurs. L'Électricité de France, comme on sait, envisage d'installer une usine marémotrice bénéficiant de la nappe d'eau s'étendant entre les îles Chausey et les côtes de Bretagne et du Cotentin. L'établissement du projet doit faire appel pour certaines recherches à une étude sur un modèle réduit auquel serait imposé une marée aussi analogue que possible à la marée observée. Mais l'étendue de la région intéressée soulève aussitôt une question délicate concernant le régime de la marée; il convient en effet de déterminer dans quelle mesure ce régime est influencé par l'accélération de Coriolis et, dans l'affirmative, si la seule solution à adopter pour tenir compte de cette circonstance dans le modèle réduit serait de faire tourner celui-ci. Etant donné la difficulté d'aborder ce problème par des méthodes classiques, l'Électricité de France a réuni une commission chargée de définir la voie à suivre pour le résoudre.

Cette commission est loin d'avoir terminé ses travaux, elle a surtout procédé à de longs échanges de vue dont le résumé fait l'objet du mémoire de M. VANTROYS.

Un premier résultat fort intéressant est dû à M. LACOMBE qui a montré que le régime de la marée le long de la côte ouest du Cotentin pouvait être valablement interprété comme résultant de la diffraction par la presqu'île du Cotentin d'une onde-marée venant de l'Atlantique; malgré les hypothèses simplificatrices introduites nécessairement pour l'exécution matérielle des calculs, ceux-ci s'accordent assez bien avec la réalité.

M. BONNEFILLE a repris l'idée de M. LACOMBE, mais en introduisant en outre l'onde réfléchie venant de la Manche orientale, dans l'espoir d'obtenir une meilleure approximation; il ne semble pas qu'un gain important en soit résulté.

Ces deux études paraissent indiquer que la

force de Coriolis n'a qu'une faible influence sur le comportement de la marée dans la région considérée. Mais un travail de M. BIESEL sur lequel nous reviendrons un peu plus loin, fait apparaître une concordance assez satisfaisante entre la circulation de courant observée dans le golfe de Saint-Malo et celle qu'il calcule à partir de la force de Coriolis, de sorte que celle-ci ne devrait pas, en fin de compte, être négligée.

Des essais sur un modèle réduit de la Manche entière ont paru conduire à une conclusion analogue en raison de l'impossibilité, à laquelle on s'est heurté, de reproduire correctement les amplitudes et les phases de la marée dans l'ensemble de la Manche, à partir d'une marée produite à l'entrée atlantique de cette mer.

Comme un modèle tournant serait très onéreux à réaliser et très délicat à exploiter, M. VANTROYS a proposé une méthode de distortion généralisée qui permettrait de tenir compte dans une certaine mesure de la force de Coriolis avec un modèle fixe.

M. KRAVTCHEVSKO a attiré l'attention sur l'importance des phénomènes de résonance et la nécessité d'en tenir compte soigneusement dans la conduite des essais sur modèle.

Enfin des méthodes de calcul par des équations aux différences finies linéarisées ont été mises en œuvre à l'aide de machines à calculer électriques pour l'étude tant de la marée naturelle que des perturbations qu'apporterait à celle-ci la construction d'une usine marémotrice.

8.

L'activité de cette commission d'études nous amène tout naturellement à aborder la communication présentée par M. BIESEL relativement à l'influence de la force de Coriolis sur les marées de la Manche.

M. BIESEL montre en premier lieu que, dans le cadre des théories usuelles de la marée, le flux d'énergie en chaque point a sensiblement la direction du courant à pleine mer et que la grandeur de ce flux est proportionnelle au produit de l'amplitude verticale par le courant maximum et la profondeur moyenne. Cette propriété permet donc d'établir aisément une carte de la circulation de l'énergie.

L'auteur montre ensuite, à l'aide des courants observés entre Jersey et les côtes de Bretagne et du Cotentin, que la circulation présente dans cette région un caractère rotationnel imputable à la force de Coriolis.

Superposant ensuite un champ rotationnel au schéma de la circulation établi par M. LACOMBE dans l'hypothèse d'une diffraction de l'onde-marée, il constate que le nouveau schéma est dans une certaine mesure plus proche que l'ancien de la circulation réelle.

9.

Toujours dans le même cadre de la commission d'études de l'Electricité de France, nous devons citer un troisième mémoire de M. VANTROYS sur la *perturbation apportée au régime des marées par le fonctionnement d'une usine marémotrice*. Il est en effet intéressant d'essayer de déterminer sous quelle forme et dans quelle mesure les caractéristiques de la marée et du courant de marée aux abords de l'usine seront modifiées par le fonctionnement même de l'usine et par la ponction d'énergie qu'elle fait subir à la marée. La connaissance tout au moins approximative de l'étendue de cette altération est d'ailleurs indispensable pour déterminer les limites à donner à un modèle réduit hydraulique de l'usine, établi en vue d'en étudier préalablement le fonctionnement. M. VANTROYS admet en premier lieu et fort légitimement que la perturbation due à l'usine ne s'étendra qu'à une distance relativement faible de celle-ci et que la zone où le régime sera altéré restera à l'intérieur de la mer littorale considérée, tandis que la marée océanique génératrice d'énergie ne sera modifiée en aucune manière.

Pour résoudre le problème qu'il s'est posé, M. VANTROYS considère le débit qui traverse les divers éléments de l'enceinte de l'usine en fonctionnement et le superpose au débit actuel au même point, c'est-à-dire en l'absence d'enceinte.

Il établit les équations du problème dans le cas d'une profondeur uniforme, puis dans celui d'une profondeur variable, il précise les conditions aux limites et discute le mode d'intégration en vue de l'exécution pratique des calculs, pour laquelle il préconise des méthodes d'approximations successives. Des applications de ces méthodes ont été faites par M. PELTIER et par M. CARTERON, qui les exposent dans les présentes Journées de l'Hydraulique sous la rubrique des « essais sur modèles ».

M. VANTROYS établit ensuite les expressions du transit différentiel de puissance moyenne induit par la perturbation à travers des segments orientés est-ouest et nord-sud.

Il montre enfin comment utiliser les calculs précédents pour déterminer la limite à donner du côté du large au modèle réduit et établit en outre la possibilité de tenir compte de la force de Coriolis dans un modèle fixe par une distorsion variable du modèle ou dans certains cas par la simple introduction d'un débit parasite à travers les parois.

10.

Avec M. LE FLOCH et son *étude harmonique des courants dans l'estuaire de la Seine* nous retrouvons la ligne classique des exposés sur la marée. Tout le monde connaît la forme particu-

lière de la courbe de marée du Havre dont la longue étale de pleine mer, la « tenue du plein », présente un grand intérêt pour la navigation; on sait aussi que cette particularité s'explique par l'existence d'ondes supérieures et composées résultant de la propagation, par les eaux peu profondes de la Manche et de la baie de Seine, de l'onde-marée provenant de l'océan Atlantique.

M. LE FLOCH montre d'abord que, si l'on ne considère que la forme de la courbe de marée et non son tracé précis, on peut aisément l'interpréter par la superposition de la seule onde lunaire moyenne semi-diurne M_2 et de ses harmoniques supérieurs; les deux premiers M_4 et M_6 suffisent d'ailleurs à expliquer la tenue du plein.

Pour l'étude des courants dans l'estuaire on peut donc se limiter à la même schématisation appliquée au courant lui-même s'il est alternatif, à ses composantes suivant deux axes rectangulaires s'il a un caractère giratoire. C'est la méthode qu'a appliquée M. LE FLOCH à un assez grand nombre d'enregistrements de courants effectués dans l'estuaire ou à l'ouvert de celui-ci. Toutefois, pour obtenir une meilleure approximation, il a également recherché l'onde semi-diurne solaire moyenne S_2 .

Les enregistrements portaient en général sur quinze jours ou trente jours consécutifs, mais ils présentaient souvent des interruptions de un ou deux jours dues à des défaillances de l'appareil enregistreur; de telles interruptions sont plus fréquentes dans les mesures de courant que dans les mesures de hauteur d'eau en raison de la plus grande complexité de l'appareil. Elles ne permettent pas d'appliquer les méthodes classiques de l'analyse harmonique et M. LE FLOCH recourut à l'emploi des « heures spéciales » de l'onde pour la séparation des composantes lunaire et solaire; toutefois pour s'affranchir de l'erreur qu'entraîneraient dans la moyenne les lacunes résultant des interruptions de fonctionnement, il prit soin de négliger également dans les sommations les mesures en opposition de phase avec les lacunes.

La schématisation des courants à l'aide des ondes semi-diurnes moyennes lunaire et solaire et des harmoniques supérieurs de l'onde lunaire permet de mettre en évidence les propriétés des courants dans l'estuaire, notamment les différences existant entre les marées de revif et de déchet, et de traduire quantitativement les phénomènes à l'aide d'une expression mathématique simple. Cette possibilité est particulièrement avantageuse pour la partie de l'estuaire assimilable à un canal de largeur et de profondeur variables, car on dispose ainsi des éléments nécessaires à l'étude de la dynamique de la propagation de la marée. En partant des développements harmoniques de la vitesse

moyenne du courant et de la hauteur de l'eau, M. LE FLOCH a montré notamment qu'il existait dans le débit un terme constant correspondant à l'évacuation du débit fluvial.

11.

Après les études théoriques générales ou consacrées à la discussion quantitative de résultats d'observation, nous arrivons à des communications moins abstraites dans lesquelles une grande place est faite à l'exécution des mesures et où l'interprétation des résultats est principalement qualitative.

M. DIEULOT présente les *mesures de courants de marées effectuées en 1953 et 1954 dans la baie du Mont Saint-Michel* pour l'étude d'un avant-projet d'usine marémotrice. Il y eut 46 points de mesures et environ 600 cycles de courants furent enregistrés, en même temps que la marée en plusieurs points du pourtour de la zone étudiée. Après une description des méthodes de mesure et des conditions d'exploitation, l'auteur donne les premiers résultats fournis par un dépouillement partiel des observations. Celles-ci étaient faites essentiellement sur la ligne allant des îles Chausey à la pointe du Grouin et sur celle joignant les îles Chausey à Granville. Les décalages entre les heures des étales de courant et celles des pleines et basses mers permettent de penser que le caractère stationnaire de l'onde-marée prédomine sur la première de ces lignes, alors que le caractère progressif se retrouve sur la seconde. D'autres particularités de la courbe de courant conduisent à admettre que le courant à travers les deux profils considérés est la somme d'un courant alternatif et d'un courant de transit continu. L'amplitude maximum du courant ne varie pas tout à fait proportionnellement à l'amplitude de la marée, mais l'interpolation linéaire reste valable sur une plage assez étendue. D'autre part, sur le profil Chausey-Grouin, la vitesse du courant de flot est à peu près la même tout le long du profil, sauf au voisinage des extrémités où elle est d'environ 25 % plus forte; au contraire en jusant la vitesse croît continuellement d'environ 50 % lorsqu'on va des îles Chausey à la pointe du Grouin. Enfin la direction du courant est pratiquement indépendante de l'amplitude de la marée, le caractère alternatif s'accroissant cependant en vive-eau; la direction du courant est en outre plus stable en flot qu'en jusant.

Plus récemment quelques séries de mesures ont été effectuées à diverses profondeurs sur une même verticale pour une vingtaine de points; le dépouillement n'en est pas encore achevé, un premier examen montre que les variations dans le temps et dans l'espace du gradient vertical de vitesse sont assez complexes.

12.

Le mémoire du professeur INDRI nous fait connaître l'importance considérable de la marée dans l'entretien naturel des trois embouchures qui font communiquer la *lagune de Venise* avec la mer Adriatique. La marée dans la lagune, qui présente une forte inégalité diurne, est bien connue depuis que S. POLLI a déterminé les constantes harmoniques de ses neuf composantes principales pour 18 points du pourtour de la lagune. On constate que la marée retarde au fur et à mesure de la pénétration dans le bassin et que dans certains cas son amplitude croît, dépassant la valeur en mer. Les canaux qui sillonnent la lagune d'un réseau très complexe jouent un rôle considérable dans les particularités de propagation de la marée; la variation de la surface du bassin intérieur avec la hauteur d'eau intervient également.

Le point le plus remarquable de la marée lagunaire est que la montée de l'eau est plus longue que la baissée ce qui entraîne une vitesse plus grande pour les courants évacuant l'eau de la lagune vers la mer.

Le maximum de vitesse moyenne est de 1,60 m/s à l'embouchure du Lido, ce qui correspond à un courant superficiel de 2 m/s. La vitesse critique d'entraînement des matériaux mesurée par l'auteur au laboratoire d'hydraulique de Padoue est de 0,25 m/s, bien inférieure donc aux vitesses des courants en morte-eau qui sont de l'ordre des 2/3 des précédentes.

Par suite les matériaux solides sont mis plus aisément en suspension en jusant et sont transportés peu à peu vers la mer; ce jeu des courants est particulièrement sensible entre les digues canalisant les embouchures, devant lesquelles les sables ne peuvent par suite pas se déposer.

Ce fait est confirmé par les bouches de Malamocco et Chioggia où l'on rencontre des profondeurs plus grandes qu'à celle du Lido et qui sont effectivement parcourues par des courants un peu plus rapides.

Étant donné l'amplitude assez faible de la marée, les circonstances météorologiques peuvent en perturber notablement le régime certains jours, mais leur action est négligeable dans l'effet global.

13.

Il nous reste pour terminer à présenter l'exposé de M. LE GRAND sur *l'énergie électromagnétique des océans*. Aucune place n'avait été prévue dans les Journées de l'Hydraulique pour cette forme assez particulière de l'énergie des mers, mais comme elle trouve surtout son application dans la mesure des courants marins, il nous a paru logique d'accueil-

lire le mémoire de M. LE GRAND dans la division qui nous occupe.

Après avoir rappelé l'ordre de grandeur des principales énergies des océans, l'auteur énumère les diverses causes d'apparition de courants électriques dans l'eau de mer. Les plus importantes résident dans l'existence des forces électromotrices induites par les déplacements de l'eau de mer dans le champ magnétique terrestre (courants marins et houle) ou par les variations temporelles de la composante verticale du champ terrestre (orages magnétiques). Mais les effets sont extrêmement faibles et ne jouent aucun rôle dans l'économie énergétique des mers.

On en a cependant tiré parti pour la mesure des déplacements horizontaux des masses d'eaux. Deux méthodes sont utilisées.

La première consiste à mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes fixes; dans le cas d'un mouvement de l'eau uniforme dans toute l'épaisseur et d'une faible conductivité du fond, on en déduit la valeur du courant marin. On a ainsi étudié le Gulf Stream entre la Floride et Cuba (160 km), les courants à travers le Pas de Calais (34 km), entre l'Angleterre et les Pays-Bas (150 km), etc. On obtient aisément les variations des courants marins, mais plus difficilement leur valeur absolue en raison de la conductibilité électrique du fond de la mer ou de différences de potentiel constantes existant entre les extrémités du câble (0,3 volt entre l'Angleterre et la France). Il est néanmoins possible d'étalonner le procédé à l'aide de mesures directes de courants.

La seconde technique consiste à remorquer derrière un navire deux électrodes espacées d'une centaine de mètres; on enregistre la force électromotrice induite dans le câble trainé par le navire, la mer ne sert qu'à égaliser les potentiels des deux électrodes, ce qui se produit quand la profondeur est grande par rapport à l'épaisseur de la couche superficielle mobile; on déduit de la mesure la valeur de la composante superficielle de la vitesse, perpendiculaire à la direction du câble remorqué. De nombreuses déterminations de courants ont été faites déjà par cette méthode qui est appelée à prendre une grande extension, en raison des valeurs instantanées qu'elle fournit, mais il est indispensable pour obtenir des résultats valables de respecter un certain nombre de précautions opératoires.

14.

Les douze mémoires que nous venons de passer très sommairement en revue constituent un apport substantiel à notre connaissance de la dynamique des mers; les uns, d'un caractère

théorique marqué, ouvrent la voie à des recherches ultérieures, d'autres offrent une incidence pratique plus directe, d'autres enfin nous exposent des phénomènes naturels et nous en donnent l'explication.

Avant de passer à la discussion de ces travaux, je voudrais vous dire quelques mots d'ordre général que m'a suggéré leur examen. La plupart des auteurs sont des ingénieurs, c'est-à-dire des scientifiques essentiellement formés aux sciences d'expérimentation, tandis que les phénomènes auxquels ils se sont attaqués ressortissent aux sciences d'observation. Dans les premières, l'ingénieur est en principe le maître des phénomènes qu'il étudie et il peut faire varier à son gré les conditions d'observation; dans les secondes au contraire, ces conditions lui sont imposées par la nature et il n'a aucune action sur elles. On conçoit donc que le processus intellectuel avec lequel on doit progresser dans l'étude de ces branches de la connaissance soit notablement différent de l'une à l'autre; on ne passe pas aisément de l'état d'esprit d'un hydraulicien, par exemple, à celui d'un océanographe, ou inversement.

Or si les sciences d'expérimentation sont traitées avec toute la profondeur nécessaire dans les grandes écoles d'ingénieurs, il n'en est pas de même pour les sciences d'observation dans le domaine physique ou plus généralement géophysique. L'enseignement de ces sciences n'est dispensé que très parcimonieusement dans un petit nombre d'Universités à un petit nombre de futurs chercheurs. Pendant de longues années cette circonstance n'avait guère d'inconvénient, mais de nos jours la course aux sources d'énergie amène de nombreux ingénieurs à se pencher de plus en plus sur les phénomènes de la nature; des méthodes géophysiques sont appliquées à la prospection minière et pétrolière; la captation des énergies naturelles, énergie de la mer, du vent, du rayonnement solaire se fera peut-être prochainement au stade industriel.

Il paraît donc éminemment souhaitable que la formation des ingénieurs soit complétée dès l'école par des aperçus de géophysique, par des notions sur les résultats fondamentaux déjà acquis et sur les méthodes appliquées aux observations et à leur analyse. Grâce à ces bases solides, les ingénieurs éviteraient au cours de leurs travaux ultérieurs de retrouver, après de laborieux tâtonnements, des résultats classiques ou de faire preuve d'un empirisme depuis longtemps dépassé, ils gagneraient ainsi beaucoup en efficacité.

Bien entendu, les mémoires présentés ici échappent à ce genre de critiques, étant l'œuvre

d'ingénieurs avertis. Mais je pense surtout à l'avenir et à la nécessité qu'il y a pour notre pays de disposer d'ingénieurs familiarisés dans une certaine mesure avec les sciences de la nature. Il ne faut pas trop compter pour y arriver sur les problèmes qui se posent plus ou moins fréquemment aux entreprises industrielles et qui les amènent à spécialiser quelques ingé-

nieurs ou à faire appel au concours temporaire de quelques universitaires, professeurs ou chercheurs. La question me paraît d'ordre plus général, la géophysique est devenue une science de culture générale, essentielle pour diverses carrières d'ingénieurs, et elle doit être l'objet d'un enseignement à la base beaucoup plus largement dispensé qu'à l'heure actuelle.

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

A la suggestion de M. LACOMBE, M. LONGUET-HIGGINS déclare, relativement au rapport n° 9 de M. VANTROYS (Régime des Marées dans la Manche et Influence de la Rotation de la Terre sur ces Marées), que M. J. CREASE, du National Institute of Oceanography (Grande-Bretagne), a étudié quelques problèmes sur la propagation des ondes longues et des « surges » de tempête, en tenant compte de la rotation de la terre (force de Coriolis (1)). Il a trouvé la solution exacte du difficile problème d'une onde périodique qui frappe une barrière assimilable à une demi-droite infinie dans un sens (direction Ox). Dans la rotation, il y aurait à peu près trois zones distinctes : celle au-devant de la barrière où les ondes sont totalement réfléchies; celle au-delà de la barrière, où les ondes sont peu changées, et une troisième zone derrière la barrière, où il n'y a pas de mouvement, excepté celui dû à la différence d'énergie au bout de la barrière. Cependant, lorsque le plan tourne, M. CREASE a trouvé qu'il y a, dans la troisième zone, une onde qui se propage parallèlement à la barrière et dont l'amplitude n'est pas diminuée en fonction de la distance x dans cette direction; mais l'amplitude est diminuée exponentiellement dans le sens y perpendiculaire de la même manière qu'une onde de Kelvin. L'amplitude de cette onde contre la barrière peut dépasser l'amplitude de l'onde incidente. Si l'on prend des chiffres correspondants, en ordre de grandeur, à une marée semi-diurne qui arrive sur la côte nord de l'Ecosse, venant de l'ouest, on trouve que le rapport de l'amplitude de l'onde transmise sur l'amplitude de l'onde incidente est à peu près 2 : 1, ce qui est en accord avec des amplitudes réellement observées.

Dans son analyse, M. CREASE n'a pas tenu compte de la perte d'énergie due au frottement interne ou à la rugosité du fond. Aussi, on ne sait si cette analyse est applicable sans modification aux marées dans la baie de Saint-Malo. Cependant, il est intéressant de remarquer que, dans une onde de Kelvin, l'amplitude est proportionnelle à : $e^{-\eta/\eta_0}$, où η désigne la distance dans la direction des crêtes, et

$$\eta_0 = (2 \omega \sin \varphi / \sqrt{gh})$$

ω = vitesse angulaire de la terre, φ = latitude, g = pesanteur, h = profondeur moyenne de l'eau.

Si l'on prend des chiffres rencontrés pour la baie de Saint-Malo, η_0 est de l'ordre de 100 km. Par conséquent, on peut soupçonner que la force de Coriolis a un effet considérable sur les marées dans cette région, quoique la conclusion puisse être modifiée par le frottement.

M. LACOMBE précise que l'onde incidente considérée par M. LONGUET-HIGGINS est une onde à crête horizontale sur un globe tournant et, par conséquent, est concomitante avec des courants de marée giratoires, et que M. CREASE a, après cette première étude appliquée à la mer du Nord, essayé d'examiner les possibilités d'application de cette méthode dans différentes zones du globe, en particulier, dans le golfe de Gascogne.

M. LACOMBE demande à M. DIEULOT s'il pourrait préciser ce qu'il entend, dans son rapport n° 3, par le caractère « progressif » ou « stationnaire » de la marée dans la région de la baie du Mont-Saint-Michel, où il a fait des observations de courant de marée.

M. DIEULOT rappelle que, dans cette zone, le caractère stationnaire ou progressif est déterminé — ou tout au moins suggéré — par l'interprétation des déphasages entre les maxima ou minima des courants et les extrêmes de la marée. Toutefois les formes des courbes présentent, en certains endroits, les caractères associés — alternatif ou giratoire — des courants enregistrés. Il y a des difficultés à caractériser ce déphasage avec précision et il faut user de précautions dans l'interprétation de celui-ci. Cependant, ces remarques paraissent vérifier l'existence d'un vaste « contre-courant » dans la partie SO de la baie du Mont-Saint-Michel, signalé dans l'ouvrage « Courants en Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique » (1).

M. LACOMBE intervient sur le rapport de M. LE GRAND : « Energie électromagnétique des Océans ». Il signale le dépouillement en cours des observations à l'appareil G.E.K. (2) faites à bord du « Norsel » par M. Jean MARTIN, dans le cadre des recherches océanographiques de l'Année Géophysique Internationale :

Parmi les difficultés rencontrées dans le dépouillement, M. LACOMBE signale la présence insolite de forces électromotrices sous l'équateur magnétique où la composante verticale du champ magnétique terrestre est nulle; ces forces pourraient être engendrées par la composante horizontale du champ terrestre dans le cas d'une différence d'immersion des électrodes remorquées par le bâtiment.

M. LE GRAND déclare que la remarque de M. LACOMBE sur le comportement du G.E.K. sous l'équateur magnétique n'est qu'un exemple des difficultés d'interprétation de cette ingénieuse méthode de mesure des courants; comme la mer ne sert qu'à égaliser des potentiels dans cette technique, on peut se demander s'il ne serait pas possible de s'en passer et de mesurer la dérive latérale du navire (donc le courant de surface) par l'action du champ vertical terrestre sur un appareil uniquement porté par le bateau (faisceau cathodique lent, par exemple).

D'autre part, M. LE GRAND se demande si l'analogie entre la force de Coriolis et celle d'un champ magnétique uniforme sur un fluide électrostatiquement chargé, a été exploitée par les ingénieurs.

Répondant à cette question, M. VANTROYS indique que cette idée a déjà été avancée, mais que son application technique soulève bien des problèmes et qu'en tout cas, elle n'a pas encore vu le jour actuellement. Se référant à sa communication (Question II, rapport 8), M. VANTROYS cite le texte suivant :

« D'autres solutions peuvent être envisagées pour résoudre la même difficulté (représentation de la force de Coriolis sur modèle réduit). Dans un autre ordre d'idées, pour utiliser l'analogie électromagnétique de la déviation d'un courant électrique par un champ magnétique, il faudrait trouver un fluide suffisamment peu conducteur pour qu'on puisse identifier le courant fluide et le courant électrique (courant de pure convention) et susceptible, par ailleurs, de recevoir une densité de charge électrostatique bien définie ». Ce problème qui paraît difficile au point de vue technologique, sera peut-être résolu un jour.

(1) Publié sous le n° 427 A par le Service Hydrographique de la Marine.

(2) Appareil électro-magnétique de mesure de courants.

(1) *Journal of Fluid Mechanics*, t. 1, pp. 86-96, 1956.

A l'invite de M. le Président, M. ALLARD indique que des résultats obtenus par M. BONNEFILLE (rapport n° 5) sont à peu près du même ordre que les siens (1). Au sujet du rapport de M. SCHÖNFELD, M. ALLARD pense que la considération des puissances réactives permet de pénétrer plus avant dans le mécanisme des échanges d'énergie; en particulier, il trouve très intéressante l'introduction des capacités dans certaines parties du territoire de la région étudiée.

En ce qui concerne la concordance des résultats de M. SCHÖNFELD (rapport n° 4, La circulation de l'énergie dans les mers littorales) avec ceux de M. ALLARD (Littérature n° 2 du rapport précité), M. ALLARD indique, sur la demande de M. le Président, que les ondes sinusoïdales lui paraissent bien représenter en gros les phénomènes de la marée. Toutefois, pour les mers littorales à contours très compliqués, des phénomènes purement hydrauliques, phénomènes liés au remplissage de certaines zones et à la réflexion d'obstacles, tels que la côte ouest du Cotentin que M. DIEULOT a évoqués tout à l'heure, se superposent aux phénomènes alternatifs et déforment les courbes sinusoïdales habituelles. Par exemple, dans la baie de Saint-Malo, la courbe de la marée prend un certain caractère stationnaire : dans la région de Chausey-Granville, l'obstacle constitué par le fond de la baie fait que l'onde progressive qui arrive le long de la côte de Bretagne, se réfléchit et le maximum de flot a presque lieu à la pleine mer alors que le décalage d'un quart de période peut être observé dans beaucoup de zones en Manche.

M. SCHÖNFELD se déclare tout à fait d'accord avec M. ALLARD : les marées dans une région comme celle des environs d'Aurigny, s'écartent beaucoup de la forme harmonique. Mais il semble néanmoins que, dans la circulation d'énergie, ce soit la composante harmonique fondamentale qui définisse à peu près complètement la valeur de la puissance moyenne.

M. ALLARD remarque, toutefois, que les écarts constatés par M. SCHÖNFELD entre sa théorie des bilans d'énergie et les résultats d'observations dans cette région,

pourraient s'expliquer par les particularités du régime des marées dans celle-ci; déformations des ondes marées, sur les faibles profondeurs, phénomènes de Venturi dans les détroits entraînant un accroissement de la vitesse du courant et un abaissement local du niveau moyen de la mer.

M. GOUGENHEIM confirme la particularité de l'île d'Aurigny, où il y a une dénivellation de plus de 1 mètre entre la face Nord et la face Sud, aux pleines mers de vives-eaux, ce qui entraîne un déversement rapide.

M. LACOMBE ajoute que, dans le schéma de la diffraction qu'il a présenté, dans cette région de La Hague-Aurigny, l'importance des courants (qui deviennent théoriquement infinis au musoir d'une jetée coïncidant avec la presqu'île du Cotentin), ainsi que la variation très rapide de l'amplitude contre la face avant de la jetée près du musoir, apparaissent nettement.

Mais, en vérifiant les conséquences de ces anomalies sur la circulation d'énergie, il a paru à M. SCHÖNFELD que cela ne pouvait expliquer que des écarts de quelques %. Il rappelle qu'il s'agissait d'harmoniser les observations avec la condition d'énergie et la condition de continuité. Or, il est arrivé, en appliquant celle-ci aux débits évalués par M. ALLARD, à trouver une marée verticale moyenne, entre Aurigny, Guernesey, Jersey et le Cotentin, d'amplitude double de la réelle; même en s'appuyant sur la condition d'énergie, il n'a pu arriver à un résultat satisfaisant et il lui paraît que les observations pourraient comporter des lacunes.

M. le Président clôt la discussion en faisant allusion à la conclusion du rapporteur général, M. GOUGENHEIM, qui a terminé son rapport en distinguant nettement les sciences d'observation des sciences d'expérimentation : il croit, cependant, que la séparation entre ces deux sortes de sciences, n'est pas si nette et que, grâce, justement, à la technique des modèles réduits, il est possible de faire une expérimentation même dans les sciences d'observation. Il souhaite, d'ailleurs, comme M. GOUGENHEIM, que se développe l'étude des sciences d'observation et, en particulier, l'étude de la géophysique dans les diverses écoles d'ingénieurs.

La séance est levée à 12 h 5.

(1) Voir rapport de M. SCHÖNFELD (Littérature, n° 5).

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