

CONFÉRENCES

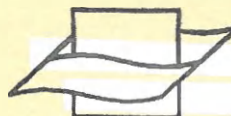
DU

CENTRE DE RECHERCHES ET D'ÉTUDES OCÉANOGRAPHIQUES

PUBLIÉES AVEC LE CONCOURS DU SECRÉTARIAT D'ÉTAT A L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

1, QUAI BRANLY, PARIS-VII^e

Tél. : Suffren 55-70



Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

LE LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE AU SERVICE DE L'OCÉANOGRAPHIE

PAR

A. NIZERY,

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES, CHEF DU SERVICE DES ÉTUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES
D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

LE LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE AU SERVICE DE L'OCÉANOGRAPHIE

Les Laboratoires d'Hydraulique sont relativement des nouveaux venus en océanographie. Cependant, ils ont pris progressivement une place appréciable dans les recherches d'océanographie physique, au fur et à mesure que l'Hydraulique devenait une véritable science expérimentale appuyée sur une théorie correcte des différentes similitudes en jeu.

Jusque-là, l'océanographe ne disposait, pour vérifier la solidité de ses théories, que des mesures effectuées dans la mer. La difficulté de ces mesures et l'impossibilité de faire varier à volonté les paramètres en cause limitaient considérablement l'efficacité de cette méthode de travail.

BASES DE L'EXPÉRIMENTATION HYDRAULIQUE

Une première conception de l'expérimentation consiste à considérer le modèle ou, plus généralement, l'appareillage expérimental, comme une machine à intégrer des équations différentielles connues, mais dont les conditions aux limites

seraient impossibles à exprimer analytiquement. Cette conception est valable dans certains cas assez limités où la simplicité relative des paramètres en jeu permet de connaître ces équations, mais où les formes des parois limitant le fluide sont des formes naturelles, c'est-à-dire essentiellement compliquées. Les conditions de similitude sont alors parfaitement connues.

Une seconde conception, qui peut être plus fructueuse est basée sur l'analyse dimensionnelle. Cette théorie, particulièrement développée à la suite des travaux de VASCHY, BUCKINGHAM et BRIDGMANN, permet de connaître la forme des équations régissant un phénomène quand on en connaît les paramètres de base. Les équations se réduisent à des relations entre un certain nombre de groupements sans dimensions. L'expérience permet alors de déterminer non plus une relation entre des grandeurs dimensionnelles, dont la transposition serait délicate, mais une relation entre des nombres sans dimensions. L'analyse dimensionnelle est même un moyen indirect de déceler les paramètres qui conditionnent un phénomène, puisque si l'un d'entre eux a été omis dans la recherche préliminaire, les résultats expérimentaux le montrent par leur dispersion.

Sans insister sur ces données de base qui sont classiques, nous diviserons notre exposé en trois parties correspondant aux catégories de phénomènes marins que les laboratoires d'hydraulique permettent d'aborder.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DE LA MER CONSIDÉRÉE COMME UN MILIEU FLUIDE HOMOGÈNE

Les phénomènes qui entrent dans cette catégorie se traduisent par les déformations de la surface libre de la mer. Ils comprennent essentiellement : la houle, les ondes à caractère stationnaire telles que les seiches, la marée.

A. — LA HOULE

La houle réelle, regardée de près, présente un caractère périodique mais assez irrégulier. Si, au contraire, on l'observe d'un avion, ses irrégularités locales s'atténuent et laissent en évidence ses caractères généraux. Les théoriciens n'ont pas attendu l'avion pour schématiser la houle ; c'est ce que fait maintenant l'expérimentateur dans ses modèles réduits. Il n'entre pas dans le cadre de cette brève revue d'aborder les différentes théories de la houle. Contentons-nous d'examiner l'attitude de l'expérimentateur.

En premier lieu, il va d'abord essayer de mesurer les caractéristiques essentielles du phénomène et, pour cela, il s'efforcera de l'enregistrer dans tous ses détails et d'analyser ses enregistrements pour séparer les composantes sans importance et dégager les principales.

Ensuite, connaissant quantitativement le phénomène essentiel, il essaiera de le reproduire et d'expérimenter sur lui.

Mesure de la houle.

D'où un premier objectif essentiel : les mesures dans le réel. Dans ce domaine, les laboratoires d'hydraulique ont joué et sont appelés à jouer un rôle essentiel. Les méthodes directes (par perche de FROUDE par exemple) ne permettant pas d'aller plus loin que la détermination approximative de l'amplitude maxima, on a cherché de tout côté depuis une dizaine d'années la meilleure méthode d'enregistrement de l'amplitude (à tout instant) de la période, et de la direction. Disons tout de suite que la solution pour la mesure de la direction n'a pas encore été trouvée ; des études américaines récentes sur l'emploi du disque de RAYLEIGH ont montré que ce procédé donnait des résultats décevants. Par contre, pour la mesure continue de l'amplitude et corrélativement de la période, des résultats concrets ont été obtenus dans deux voies différentes.

a) On peut faire la mesure directe de l'amplitude en émettant, à partir d'un appareil immergé, des ultra-sons qui se réfléchissent à la surface libre et dont l'écho est reçu sur un récepteur placé à côté de l'émetteur. Les indications de l'appareil sont renvoyées au rivage par un câble, l'enregistreur étant par conséquent en permanence à la portée de l'observateur. Un exemple très réussi est la station installée au voisinage des îles Chausey par l'Électricité de France (Service d'Études de l'Utilisation des Marées). L'émetteur récepteur est un appareil anglais Husun.

b) On peut aussi passer par l'intermédiaire des pressions à une certaine profondeur au-dessous de la surface libre. On sait alors que le décrement d'amplitude de la houle en fonction de la profondeur dépend de la période de la houle.

Par conséquent, la transposition des mesures de pression en mesures d'amplitude dans une houle composée de trains d'ondes superposés, suppose l'analyse préalable des fréquences des composantes. Mais ceci n'a qu'une importance réduite et même simplifiée jusqu'à un certain point le travail car toutes les petites irrégularités de surface de très faibles périodes sont pratiquement filtrées si bien que le phénomène de base peut être mis en évidence par un choix judicieux de la profondeur d'immersion et de la sensibilité de l'appareil. Les périodes des composantes principales ayant été décelées par un analyseur, on peut alors restituer les amplitudes compte tenu du décrement fonction de la profondeur de l'appareil et de la période de la composante correspondante.

L'État-Major combiné anglo-américain avait fait réaliser pendant la guerre des appareils de ce type, en vue des opérations

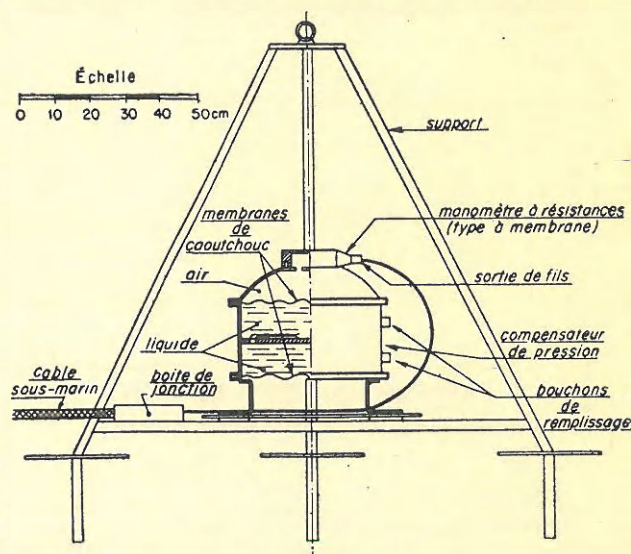


Fig. 1. — Manomètre à houle.

de débarquement. Depuis lors, la question a été résolue en France par le manomètre à houle du Laboratoire National d'Hydraulique dû à M. VALEMBOIS ⁽¹⁾. L'appareil comporte essentiellement :

— Une chambre remplie d'eau dans laquelle règne la pression réelle, cette chambre étant en contact avec la mer par une membrane en caoutchouc souple ;

— Une chambre qui communique avec la précédente par un tube fin d'amortissement et dans laquelle règne la pression moyenne ;

⁽¹⁾ VALEMBOIS, « La Houille Blanche » (numéro spécial) B. 1949, 7 p., 7 fig. « Un manomètre enregistreur de pressions sous-marines pour la détermination des caractéristiques de la houle par la mesure des variations de pression en profondeur. »

— Un manomètre différentiel qui mesure la différence de pression entre les deux chambres, et qui donne par conséquent à chaque instant l'excès ou la réduction de pression dû à la houle.

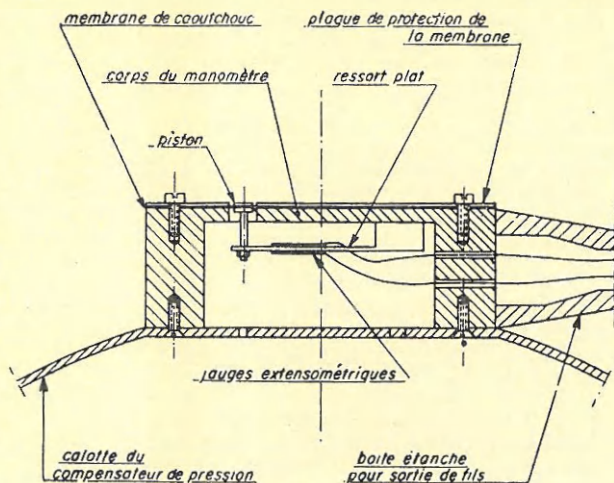


Fig. 2. — Manomètre à houle. Dispositif différentiel.

Le manomètre comporte un piston maintenu par un ressort, la pression agit sur le piston et les déformations du ressort qui en résultent sont mesurées et enregistrées par deux strain-gages. Avec une amplification convenable, la sensibilité du dispositif est énorme.

Dans sa version actuelle, l'appareil est relié au rivage par un câble isolé et le poste d'enregistrement est placé sur la côte, ce qui est très intéressant pour les cas, comme la prévision de la houle, où l'on désire disposer en permanence du résultat des mesures.

Cependant, il est des cas où l'éloignement de la côte rend cette disposition prohibitive et où il est possible d'attendre quelques semaines avant de disposer des enregistrements. Nous étudions pour ces cas un dispositif autonome qui sera immergé avec tout l'appareillage d'enregistrement. Un prototype est actuellement en cours d'essai à la mer.

Étude graphique de la propagation de la houle.

Avant d'expérimenter sur la houle, le Laboratoire essaye d'abord de dégrossir le problème sur le papier. Il emploie à cet effet une méthode graphique dite des « plans de houle ». Cette méthode, partie de l'idée que la propagation de la houle sur la surface de la mer pouvait être assimilée à la propagation de la lumière ⁽¹⁾ a donné lieu récemment à une abondante littérature. Elle assimile les déformations d'une houle en profondeur variable à la propagation d'un rayon lumineux dans un milieu réfringent. De même, il y aura réflexion comme dans la lumière quand l'onde aborde un obstacle « réfléchissant » et diffraction quand elle contourne un obstacle.

Je n'insisterai pas sur les justifications théoriques et les vérifications expérimentales de cette méthode

que M. LACOMBE doit traiter dans la conférence qu'il fera ici même dans 15 jours. Il y a là une méthode précieuse mais dont la pratique montre cependant les limites dans les cas complexes où la composition des ondes réfractées, réfléchies et diffractées devient inextricable, parfois même hasardeuse.

Étude expérimentale.

Enfin, le laboratoire aura recours à l'expérimentation.

Rappelons tout d'abord que, pour mener à bien l'expérience, il convient de bien connaître les composantes principales de la houle. Ce sera facile dans beaucoup de cas, mais bien plus délicat dans d'autres car, du fait du relief sous-marin, la côte pourra parfaitement être abordée par des systèmes complexes d'ondes. Il faudra alors tout l'arsenal des mesures des photos aériennes, et des plans de houle pour dégager l'essentiel du phénomène à représenter.

Les trois problèmes principaux de l'expérimentateur seront :

- La génération de la houle ;
- Sa mesure dans le modèle ;
- Le choix des échelles.

a) Génération de la houle.

De nombreuses variétés de générateurs de houle ont été imaginées. Pour nous limiter aux plus courants, nous citerons : le coin plongeur, le rouleau excentré, les différents types de volets batteurs. Chaque type a ses avantages et ses inconvénients. Mais le plus apte à engendrer une houle convenable paraît bien être le volet batteur. Il se compose d'une plaque plongée dans l'eau à laquelle un mécanisme approprié communique un mouvement oscillant ayant la période du phénomène à l'échelle adoptée pour les temps. Les mouvements de cette plaque correspondent approximativement à la déformation des verticales dynamiques de la masse d'eau pendant chaque période. Il en résulte par conséquent que, suivant le rapport existant entre la longueur d'onde de la houle et la profondeur, le mouvement de cette plaque pourra être différent et il faudra pour bien faire que les déplacements de sa partie supérieure et de sa partie inférieure soient ajustés au cas d'espèce grâce à des mécanismes indépendants. Les batteurs de houle du Laboratoire de Chatou répondent à ces conditions, ce qui permet de les utiliser dans des cas très variés allant de la houle de longue période en profondeur faible à la houle courte en grande profondeur.

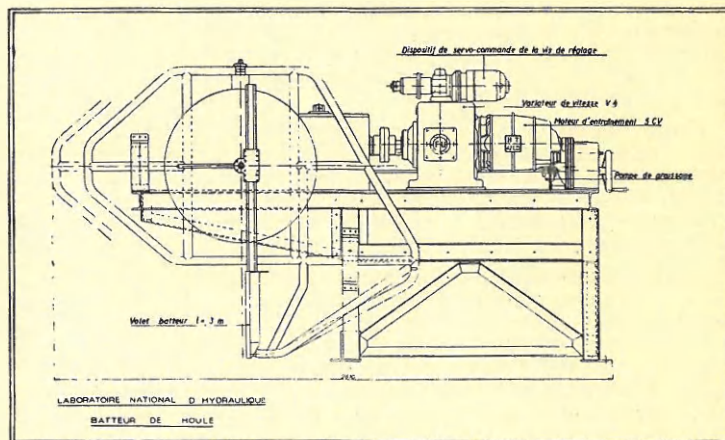


Fig. 3.

⁽¹⁾ Cf. GRIDEL, « Annales des Ponts et Chaussées », 1946, p. 77-105 et 330-551 « Essai d'application des résultats de la physique ondulatoire à l'étude des phénomènes de propagation de la houle. »

Évidemment, il serait nécessaire, pour obtenir un mouvement orbital parfait, que le volet lui-même se déforme pour avoir à chaque instant la forme des verticales dynamiques. Mais la pratique montre que cette complication ne s'impose pas car la houle se purifie au bout de quelques longueurs d'ondes.

D'ailleurs, la production d'une houle pure dans un modèle se heurte à une difficulté beaucoup plus grande qui résulte du retour sur l'appareil générateur de la houle réfléchi sur les diverses limites du modèle. Pour éviter ce grave inconvénient, M. BIESEL, Ingénieur au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, a imaginé d'interposer entre l'appareil générateur et le modèle un filtre qui, absorbant une partie importante de l'énergie, rend pratiquement négligeable l'action de ces ondes réfléchies sur le batteur. Le Laboratoire National d'Hydraulique réalise et utilise un dispositif de filtre très simple dans lequel l'énergie est absorbée dans un panier en grillage rempli de paille d'emballage.

Le filtre à houle constitue un progrès très important dans les études expérimentales de houle. Grâce à lui, on peut obtenir maintenant des phénomènes d'une fidélité remarquable si bien que la dispersion des mesures, qui atteignait couramment 25 à 30 %, a été réduite dans de très larges proportions.

Naturellement, la réalisation des conditions aux limites des modèles exige fréquemment l'emploi de dispositifs dissipateurs d'énergie qui sont placés aux limites non réfléchissantes du modèle. Ce sont, soit des talus de profil spécialement calculés, soit des caisses ou paniers remplis de cailloux ou de matériaux tels que tournures métalliques, paille...

b) Mesure de la houle sur les modèles.

On se contentait au début de mesures grossières de maxima d'amplitude avec des pointes limnimétriques. Ces pointes ont été perfectionnées par un circuit électrique à bas voltage qui se ferme dès que la pointe est au contact et agit sur un détecteur électronique.

Dans les laboratoires où on n'emploie pas le filtre à houle, l'irrégularité des creux exige l'emploi de méthodes de mesures statistiques qui mettent en évidence le creux moyen. Un exemple intéressant de ce type d'appareil est celui du Laboratoire d'Hydraulique de Delft (*). Mais tous ces appareils ne donnent que la valeur du creux sans donner la variation de l'amplitude en fonction du temps.

Le Laboratoire National d'Hydraulique a réalisé un appareil qui résout complètement le problème dans le cas de petites amplitudes grâce à l'emploi d'une « pointe vibrante » d'un système breveté imaginé tout d'abord pour la mesure des niveaux assez lentement variables. Dans ce cas, la pointe vibrante est placée à un niveau moyen fixe et l'enregistrement est commandé en utilisant dans un montage électronique simple les variations de courant fonction des temps d'immersion et d'émersion de la pointe.

Toutes ces mesures ont l'inconvénient d'être limitées à un petit nombre de points. Or, il est difficile sinon impossible de prévoir d'avance les emplacements où les variations d'amplitude sont vraiment caractéristiques de l'agitation sur une grande surface. La méthode du « ciel étoilé » dont nous parlerons plus loin répond à cette objection.

Enfin, la photographie et le cinéma sont des instruments de mesure précieux quand il s'agit d'étudier un phénomène réduit à deux dimensions dans un canal à parois verticales vitrées parallèles. On peut en déduire les trajectoires des particules liquides et même la chronophotographie bien connue dans les Laboratoires d'Hydrodynamique et d'Aérodynamique permet de passer à l'étude quantitative du champ des vitesses.

c) Choix des échelles.

La houle étant essentiellement un phénomène gravitaire, son étude expérimentale se fait dans le système de similitude dit de REECH-FROUDE. Dans ce système, le rapport des forces d'inertie et des forces de pesanteur est identique dans le modèle et dans le réel, ce qui impose une relation entre l'échelle de réduction des longueurs et celle des temps (condition de similitude).

Les échelles de réduction des dimensions linéaires du réel doivent être choisies aussi petites que possible pour des raisons économiques évidentes. Mais on se trouve limité dans ce sens d'une part par la nécessité de faire des mesures d'une précision acceptable, d'autre part par le risque de faire intervenir dans un modèle trop petit l'action de la viscosité et de la tension superficielle. La limitation due à la précision des mesures n'existe pratiquement plus maintenant grâce aux appareils mis au point ces dernières années. Par contre, l'action de la viscosité est toujours à craindre lorsque la profondeur d'eau dans le modèle devient faible par rapport à la longueur d'ondes ; mais surtout l'action de la tension superficielle doit être considérée de très près. On sait en effet que, lorsque dans un bassin de profondeur déterminée on engendre par un batteur des ondes de surface de périodes décroissantes, on passe d'un phénomène d'ondes de gravité, pour les longues périodes, à un phénomène d'ondes capillaires en passant par des phénomènes intermédiaires qui sont commandés à la fois par la pesanteur et la tension superficielle. Il est donc indispensable de se placer à coup sûr dans le domaine des ondes de gravité, ce qui impose une période minimum donc, pour une houle déterminée, une échelle des dimensions linéaires minima. Pratiquement, il ne faut guère descendre au-dessous de 0,3 s, ce qui avec des houles courtes (5 s) peut conduire à un minimum d'échelle linéaire de 1/200 environ.

Par ailleurs, on peut songer, pour réduire les dimensions géométriques du modèle sans réduire exagérément les profondeurs, à « distordre le modèle » c'est-à-dire à adopter pour les profondeurs une échelle plus grande que pour les dimensions horizontales. Cette méthode soulève des objections car la célérité de la houle en profondeur faible est grossièrement égale à \sqrt{gH} , H étant la profondeur ; dans ces conditions, la distorsion déforme le canevas des crêtes de houle ; il ne faut donc l'employer qu'à bon escient après s'être assuré que les modifications qu'elle entraînera n'auront pas de conséquences sur le problème étudié.

B. — LES SEICHES

Les seiches sont des ondes stationnaires qui peuvent se produire à la surface libre d'un plan d'eau limité par des parois continues ou non, lorsqu'on applique à la surface libre des perturbations dont la période coïncide avec certaines périodes caractéristiques de la forme et des dimensions du bassin. On les observe dans les lacs où la perturbation est attribuée aux variations de la pression barométrique. On les observe dans des nombreux ports où elles sont généralement attribuées à l'existence, dans le spectre de la houle incidente, de composantes de très longues périodes. Ce phénomène a donc tous les caractères d'une mise en résonance. C'est ainsi que, dans le port de Tamatave sur la côte est de Madagascar, on observe le long des quais des amplitudes horizontales d'une dizaine de mètres et d'une période de l'ordre de 80 s. On peut citer aussi, parmi les seiches les plus connues, celles du port de Cap-Town et celles des petits ports de la côte du Guipuscoa, qui ont été corrigées par les travaux de M. IRRIBARREN.

(*) « La Houille Blanche », juillet-août 1948, p. 515-518, 2 fig. Appareil pour la mesure de la houle en laboratoire.

La seiche du port de Tamatave avait été étudiée à petite échelle avant la guerre de 1939-1945 par M. l'Ingénieur Général BARRILLON au Bassin des Carènes de la Marine. Les études ont repris en 1947 au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou dans un modèle de 1/300 sans distorsion. Elles ont permis de retrouver les périodes critiques de mise en résonance en envoyant dans le modèle des impulsions de périodes croissant de 2,3 à 11 s.

On a caractérisé l'agitation dans chaque cas par l'amplitude des mouvements horizontaux d'une palette sans inertie, enregistrés par cinéma. Parallèlement on étudiait la structure de la seiche au ciel étoilé. Les ondes stationnaires sont, on le sait, caractérisées par un système de ventres et de nœuds dont les dispositions peuvent être très différentes suivant les cas dans le même bassin. La méthode dite du « ciel étoilé » due à M. BARRILLON permet de mettre le système en évidence et de conce-

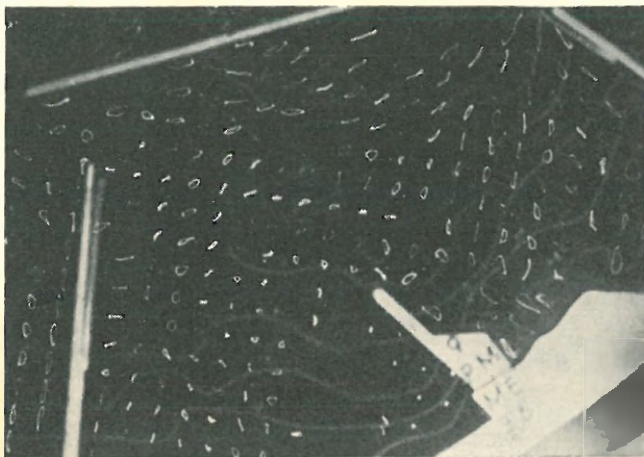


Fig. 4. — Étude de houle par le procédé du « ciel étoilé ».

voir par conséquent des remèdes à l'agitation. Cette méthode consiste à photographier l'image dans le plan d'eau d'un quadrillage de points lumineux. À chaque période du phénomène, ces images décrivent une courbe fermée qui se réduit à un point dans le cas d'un nœud d'agitation horizontale (qui est en même temps un ventre d'agitation verticale). L'allure du phénomène a permis par la suite d'en déceler l'origine; interférence de l'onde réfléchie sur le récif corallien limitant la passe d'entrée du port avec l'onde diffractée par la jetée. On a ainsi été conduit à trouver le remède consistant en une jetée transversale qui supprime cette interférence.

C. — MAREES

L'étude expérimentale des phénomènes généraux de marée est encore hors de portée des laboratoires d'hydraulique. Par contre le problème complexe des déformations de la marée au voisinage des côtes et surtout dans les estuaires a été attaqué depuis longtemps par la voie expérimentale. Il est même curieux de constater que les modèles d'estuaires à marée figurent parmi les « ancêtres » des modèles hydrauliques. Malheureusement, on voulut à l'origine s'attaquer simultanément à l'étude de la propagation de la marée et à ses conséquences sur des fonds mobiles. Les déboires obtenus dans certains de ces essais ont été la cause d'une longue interruption dans le développement de l'hydraulique expérimentale.

Les problèmes essentiels sont les suivants :

Tout d'abord, la propagation de la marée dans un modèle d'estuaire est commandée par la réalisation aux limites du modèle des conditions de niveau et de vitesses homologues à celles de la nature. Pour la limite aval, cela pose seulement un problème d'appareil générateur de marée. Pour la limite amont, on pourrait évidemment utiliser un autre appareil générateur, mais il ne faut pas oublier qu'un modèle de ce genre n'est pas seulement destiné à représenter les phénomènes naturels actuels, mais aussi leur transformation sous l'action d'une intervention humaine (travaux de dragage, de calibrage...). Or, si l'on peut facilement éviter que ces travaux influent sur les conditions aux limites aval, il n'en est pas souvent de même pour la limite amont. On est donc souvent amené à placer la limite amont du modèle à l'extrémité de la zone fluviale où se fait sentir l'influence de la marée. Pour limiter les frais, la partie supérieure de cette zone est schématisée par un labyrinthe où le cours de la rivière est représenté en section, profondeur et longueur, le lit étant replié plusieurs fois sur lui-même pour réduire l'encombrement.

Ensuite, se présente une grosse difficulté, c'est la rugosité des fonds.

On sait que la propagation de la marée en estuaire est un phénomène essentiellement gravitaire, ce qui commande de le représenter en similitude de REECH-FROUDE; mais en raison des grandes dimensions des estuaires, on est amené à consentir une distorsion des échelles qui se justifie sans difficulté quand il s'agit d'étudier des phénomènes généraux. Mais les équations du mouvement montrent qu'alors la rugosité du modèle doit être hypertrophiée par rapport à celle de la nature. Ceci conduit pour les modèles fortement distordus à de véritables obstacles qui peuvent déformer gravement les écoulements locaux. C'est pourquoi si, dans certains cas particuliers, on a pu consentir des distorsions importantes, il faut être au contraire très prudent lorsque l'on voudra sur un tel modèle étudier des phénomènes localisés comme des affouillements.

C'est ainsi que le Laboratoire des Ponts et Chaussées à Anvers a pu étudier des phénomènes d'inondations par les marées tempêtes dans l'estuaire de l'Escaut avec une distorsion de 18 (échelle 1/1 250, 1/60). Le Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Delft a également adopté une énorme distorsion 35 (échelle 1/2 400, 1/64) pour l'étude des embouchures du Rhin et de la Meuse. Par contre, le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (Neyrpic) a dû limiter à 5 la distorsion de son modèle de l'estuaire de la Rance en vue de l'étude de l'usine marémotrice qui est projetée. De même, le Laboratoire National d'Hydraulique à Chatou a adopté une distorsion de 6,66 pour les deux grands modèles de la Loire et de la Gironde où est en cause l'action éventuelle de corrections locales du lit. De même que dans l'étude de la houle, la technique du Laboratoire tourne autour de deux points principaux :

Il faut produire la marée, il faut ensuite la mesurer.

Appareils générateurs de marée.

Le problème consiste à introduire ou extraire à chaque instant dans la section aval du modèle un débit d'eau tel que le niveau et les vitesses dans cette section soient homologues à ceux de la nature. La correspondance entre les débits et les temps étant déduite de la condition de REECH-FROUDE, on arrive par exemple, dans l'estuaire de la Gironde établi aux échelles (3/2 000, 1/100) à un débit maximum de 250 l/s, le cycle de la marée durant environ 11 mn. Il existe maintenant une grande variété d'appareils à marée. Certains utilisent un gros plongeur qui monte et descend dans une cuve à l'aval du modèle. Nous parlerons seulement du système basé sur un circuit de pompe : une pompe amène, par l'intermédiaire d'un bac à niveau constant, un débit constant dans la cuve aval du modèle. Celle-ci comporte une vanne de vidange à commande réglable qui évacue un débit variable de telle manière que le débit amené moins le débit évacué corresponde à la loi de débit imposée.

La vanne d'évacuation est commandée par un mécanisme qui l'ouvre si le niveau dans le modèle est plus haut que la loi de niveau imposée et le ferme en cas contraire. La loi de niveau imposée est matérialisée par une came qui donne le niveau en fonction du temps, le niveau réel dans le modèle est repéré et transmis par un limnimètre. S'il est trop brutal, le mécanisme de commande de la vanne, actionné par la différence de ces deux niveaux, peut être sujet à des oscillations autour de la position correcte (appelées couramment le pompage). On se trouve donc en présence d'un problème analogue à celui des régulateurs de machines et les solutions adoptées varient d'un laboratoire à l'autre. Citons en particulier l'élégante solution imaginée par M. VALEMBOIS pour le modèle de la Gironde, déjà cité plus haut ⁽¹⁾.

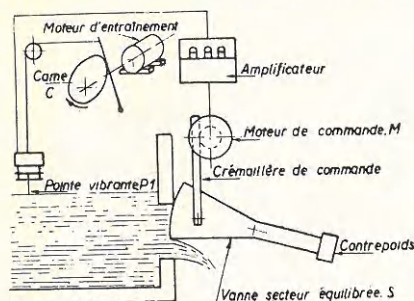


Fig. 5. — Modèle de la Gironde. Appareil à marée.

- La came C est constituée par un dispositif électronique de reproduction de marée.
- Le moteur de commande M est alimenté par un courant fonction de l'écart entre le plan d'eau du modèle donné par la pointe vibrante et le niveau à réaliser imposé par la came électronique.

Mesures de la marée.

Ces mesures sont essentiellement des mesures de niveau et des mesures de vitesse.

Les mesures de niveaux variables sont difficiles à faire avec une bonne précision. Les systèmes qui font appel à des flotteurs ne sont guère recommandables dans ce cas ; l'effort s'est porté en France dans ces dernières années sur les pointes suiveuses.

Une première réalisation a été faite par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique en vue du modèle de la Rance. Il s'agit de pointes suspendues à un fil qui descendent jusqu'au contact de l'eau, établissant un circuit électrique qui enregistre le niveau atteint et les fait remonter légèrement jusqu'à la descente suivante. La cadence des coups est de l'ordre de la demi-seconde.

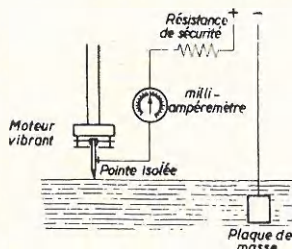


Fig. 6. — Principe de la pointe limnimétrique à vibrations entretenues.

⁽¹⁾ J. VALEMBOIS, Étude d'un appareil permettant la reproduction de l'onde marée dans un modèle d'estuaire.
« La Houille Blanche », numéro spécial B. 1950, 6 p. 4 fig.

A l'occasion des modèles de la Loire et de la Gironde, le Laboratoire National d'Hydraulique a éliminé les inconvénients de la tension superficielle et de la discontinuité des enregistrements, en faisant vibrer à 50 périodes par seconde la pointe palpeuse. On utilise la variation de la quantité de courant passant dans le circuit en fonction de sa position moyenne par rapport au plan d'eau pour ajuster automatiquement la position de la pointe au niveau variable. L'enregistrement est continu et atteint la précision effective du 1/10 mm ⁽¹⁾.

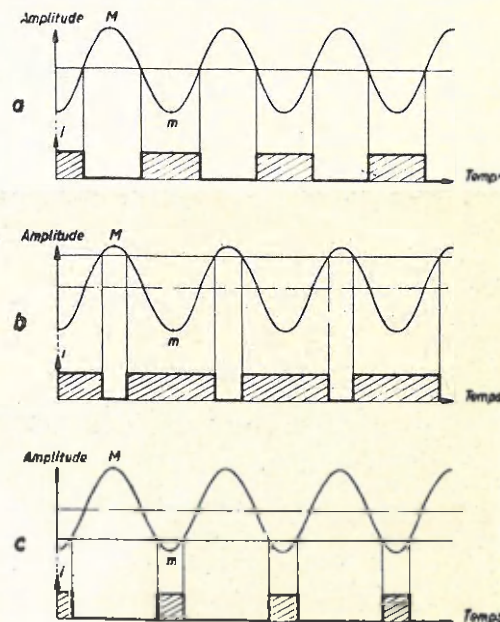


Fig. 7. — Graphiques du courant modulé en fonction des positions de la surface libre par rapport à la vibration de la pointe.

Réglage du modèle.

En possession de ces divers instruments et des fonds réalisés correctement, il ne restera plus à l'expérimentateur qu'à régler son modèle. Ce n'est pas là une petite affaire. La rugosité d'un lit n'est pas aussi schématique que celle qui tapissait les tubes expérimentaux de NIKURADSE. Elle présente toute une gradation depuis la forme générale du lit jusqu'à la granulométrie des matériaux de fond, en passant par les irrégularités du type des riddens. Il est donc vain d'espérer prédéterminer avec précision la forme et la disposition des éléments constitutifs de la paroi du modèle. Il faut procéder par tâtonnements longs et patients. On produit en aval une marée bien définie et on observe sur les limnigraphes du modèle, placés aux emplacements homologues de ceux de la nature, la progression de l'onde marée. Les écarts constatés entre le réel et le modèle guident alors l'expérimentateur vers les corrections à apporter à la rugosité du lit. Les modes de réalisation de la rugosité varient d'un laboratoire à l'autre, métal déployé au Laboratoire Dauphinois, plaquettes rectangulaires au Laboratoire d'Anvers, plaquettes allongées à Delft, plaques minces sur tige à Vicksburg (U. S. A.), petits plots en fonte à Chatou ; mais partout la méthode demande beaucoup de patience et de sens critique.

Le modèle une fois réglé, il est facile, en y introduisant les modifications envisagées, de déterminer leurs conséquences sur le niveau de la marée et sur les vitesses de l'écoulement.

⁽¹⁾ H. GRIDEL, La mesure précise et l'enregistrement des niveaux stables ou fluctuants au moyen de pointes limnimétriques à vibrations entretenues.
« La Houille Blanche », B., novembre 1950, 9 p., 8 fig.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE DE LA MER EN TANT QUE MILIEU HÉTÉROGÈNE

Ce que nous avons vu jusqu'ici fait partie de l'Océanographie, mais déborde également dans un domaine beaucoup plus large d'activité technique, celui des travaux maritimes. Au contraire, l'étude dynamique de la mer dans toute sa complexité n'intéressait guère jusqu'ici que les océanographes et il a fallu un problème industriel tout particulier, l'utilisation de l'énergie thermique des Océans, pour qu'un laboratoire d'Hydraulique abordât ces problèmes.

Les spécialistes savent bien que la mer est un milieu très hétérogène, qu'en particulier la densité, la salinité et la température de ses eaux varient d'un point à un autre. C'est précisément cette hétérogénéité du milieu qui est à la base de l'explication de bien des phénomènes marins tels que courants, houles ou marées internes... Jusqu'ici les chercheurs disposaient de deux instruments de travail, les mesures dans la nature et la théorie. Mais l'un et l'autre sont dans ce domaine des instruments bien précaires. L'immensité des zones à explorer pour avoir en mains toutes les données du problème, la difficulté pour le théoricien de baser ses raisonnements sur une connaissance suffisante des paramètres en cause, tout cela montre la nécessité de l'expérience qui peut faire varier les paramètres à volonté et permet ainsi de découvrir le mécanisme des phénomènes.

Le premier exemple important d'expériences dans ce domaine date de quelques années. Ces recherches ont été effectuées par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique pour le compte du C. N. R. S. (Service d'Étude de l'Énergie Thermique des Mers). Elles n'avaient pas, à vrai dire, un but purement océanographique. Il s'agissait de trancher le débat qui avait divisé Georges CLAUDE et ses contradicteurs sur ce qui se passerait dans la mer lorsque, par un tube d'aspiration à gros débit, on viendrait puiser l'eau froide du fond.

Les pessimistes, considérant les très faibles différences de densité de l'eau de mer, disaient que l'eau puisée proviendrait de toutes les profondeurs, comme en milieu homogène. Les optimistes prétendaient au contraire que, du fait du caractère

gravitaire de l'écoulement seule une couche horizontale d'une épaisseur égale au diamètre de la prise serait aspirée.

L'expérience a permis de résoudre ce difficile dilemme. Ce n'était d'ailleurs pas la première fois que des chercheurs se penchaient sur un problème d'écoulement en milieu stratifié ; les phénomènes météorologiques, tels que le calme du soir, l'écoulement des courants de vase dans les grandes retenues hydrauliques, les échanges d'eaux salées et douces dans les estuaires à marée avaient déjà été abordés.

La première étape de la recherche fut d'étudier ce qui se passe avec deux couches superposées de densité différente, ce qui permit de définir ce qu'on appela la hauteur limite d'aspiration et d'en étudier les lois. On étudia théoriquement le schéma d'écoulement comme résultant du raccord entre un écoulement gravitaire et un point puits, puis par l'analyse dimensionnelle on trouva le paramètre sans dimensions régissant le phénomène et on put établir par l'expérience la forme de l'équation de base et ses constantes.

En deuxième étape, on passa à la superposition de plusieurs couches puis à l'écoulement dans un milieu à gradient de densité continue.

Enfin lorsque la transposition des lois régissant la hauteur limite d'aspiration eut été généralisée à ces cas plus complexes, on fut amené à chercher s'il n'y avait pas un domaine expérimental dans lequel la viscosité pourrait intervenir et on constata qu'effectivement, aux très faibles nombres de Reynolds, l'écoulement aspiré perdait son caractère purement gravitaire. Au cours de ces recherches, on eut souvent l'occasion de faire des observations sur les ondes d'interfaces qui se produisaient entre deux couches superposées et sur leur déferlement.

Nous pensons que ces essais ont ouvert une voie extrêmement fertile pour l'océanographe qui y trouvera la possibilité d'étudier le mécanisme même de la dynamique interne de la mer.

TROISIÈME PARTIE

ACTION DE LA MER SUR SES PAROIS

Nous abordons maintenant une catégorie de problèmes qui touchent à la fois à l'Hydraulique, l'Hydrographie, l'Océanographie et la Géologie.

Les matériaux qui tapissent le fond de la mer, au moins à proximité des côtes, résultent de la destruction des rivages, soit par le choc des lames, plus ou moins aidé par la décomposition chimique et par l'action des courants.

Ces matériaux ne sont pas toujours immobiles. Ils se déplacent sous l'action des mouvements de la mer résultant soit de la houle, soit des courants. On distingue dans ces déplacements deux aspects différents :

1° Le charriage, au cours duquel le matériau ne quitte pas le fond, mais glisse ou roule.

2° La suspension, au cours de laquelle le matériau se déplace « entre deux eaux » sans toucher le fond.

Entre les deux, se place la saltation dans laquelle les grains quittent le fond mais y retombent après un court trajet.

Les courants comme la houle peuvent provoquer des déplacements de matériaux en charriage et en suspension. Souvent même, c'est l'action combinée de la houle et des courants qui est en cause, la houle mettant le matériau en suspension, les courants les transportant plus loin.

Les Laboratoires d'Hydraulique étudient des problèmes tout à fait analogues dans les cours d'eau et leurs méthodes peuvent être transposées au « débit solide » marin. Il ne peut être question ici d'aborder dans son ensemble ce vaste problème. On l'a d'abord traité par des voies purement empiriques, puis les hydrauliciens se sont efforcés d'y introduire la méthode expérimentale. Nous allons passer en revue quelques exemples des difficultés qui ont été rencontrées et qui ne sont pas encore toutes résolues.

1^o Études d'estuaires à marée à fonds mobiles.

Il est curieux de constater que l'étude du mouvement des fonds dans les estuaires à marée a été une des premières questions abordées par les Laboratoires d'Hydraulique. Il est manifeste qu'à l'époque les expérimentateurs se sont préoccupés uniquement de la similitude de la propagation de la marée, et n'ont pas vu que le transport des matériaux par l'écoulement posait un autre problème de similitude tout différent du premier. Les résultats ont été décevants, ce qui a jeté pendant longtemps le discrédit sur ce genre d'études.

Si, pour simplifier, l'on admet que le transport des matériaux s'effectue uniquement par charriage, le problème à résoudre peut se résumer comme suit :

a) Le modèle doit représenter correctement les phénomènes hydrauliques c'est-à-dire, dans le cas d'espèce, la propagation de la marée. Il en résulte une condition de similitude qui, en supposant négligeables les effets de la viscosité dans le modèle, est la condition de REECH-FROUDE ; cette condition impose une relation entre l'échelle des temps et les échelles de dimensions linéaires.

b) L'équation du mouvement (par exemple sous la forme que lui a donnée SAINT-VENANT) fait intervenir un terme de pertes de charge ; ces pertes de charge résultent des formes de l'estuaire (pertes à la Borda) et de la rugosité des fonds (pertes par frottement). Il est donc nécessaire de s'assurer de la similitude de ces pertes, ce qui entraîne l'intervention dans une seconde relation de la constitution de la paroi, sous la forme de la granulométrie des matériaux. Celle-ci est donc imposée en fonction de l'échelle des longueurs et de celle des temps. On voit bien en particulier, comme nous l'avons vu plus haut à l'occasion de la marée, que la distorsion des échelles linéaires impose une rugosité relative plus forte que la rugosité relative naturelle.

c) Enfin, quand on veut respecter la similitude des conditions d'entraînement des matériaux, la difficulté s'accroît, car si l'on admet, avec la plupart des auteurs, que le débit solide est une fonction des caractéristiques de l'écoulement liquide et de la granulométrie des matériaux de fond, on risque d'aboutir à une incompatibilité entre la condition d'entraînement et les deux premières. Heureusement, un paramètre supplémentaire reste à la disposition de l'expérimentateur, c'est le poids spécifique du matériau, qui introduit un nouveau degré de liberté dont il avait besoin pour sortir de l'impasse.

L'expérience a montré que l'emploi de matériaux légers permettait en effet de concilier l'ensemble des conditions que nous venons d'esquisser, mais les possibilités pratiques de choix du poids spécifique des matériaux limitent, par voie de conséquence, la distorsion admissible sur les modèles.

Quand on aborde le problème des transports en suspension, le problème devient encore plus compliqué. De nombreuses recherches de base ont bien mis en évidence d'une manière suffisante le mécanisme du phénomène de transport et, par conséquent, ses conditions de similitude. Mais celles-ci ne sont pas compatibles avec celles du charriage. De plus, si l'on connaît le transport en suspension en régime uniforme, on sait fort peu de choses sur la « mise en suspension » et sur la décantation qui en sont le commencement et la fin et qui conditionnent les échanges de matériaux entre le fond et la masse liquide. Ainsi, dans l'étude de ces problèmes on se trouve réduit pour le moment à des méthodes empiriques.

Les hydrauliciens anglais, notamment ceux d'entre eux qui ont travaillé aux irrigations aux Indes, ont tiré d'une longue expérience dans la construction des canaux des formules empiriques sur l'écoulement des eaux chargées de matériaux solides (KENNEDY, sir CL. INGLIS...). Ces formules globales caractérisent ce qu'ils appellent l'écoulement « en régime »

dans un canal, c'est-à-dire l'écoulement d'une eau chargée de matériaux en transit, sans érosion, ni dépôt. Elles ont donné et continuent à donner d'excellents résultats dans le domaine des observations qui leur a donné naissance ; mais, enhardis par ces succès, divers auteurs (LACEY en particulier) ont essayé de tirer de là une théorie générale des écoulements turbides et d'en déduire un critérium de similitude de ces écoulements.

Si la validité de cette théorie pouvait être pleinement établie, on y trouverait une justification a posteriori des très grandes distorsions adoptées dans les premiers modèles d'estuaires à marée de REYNOLDS et VERNON-HARCOURT. Malheureusement, il subsiste des contradictions difficiles à écarter, avec la similitude de l'écoulement hydraulique proprement dit et les quelques essais d'applications tentés notamment aux États-Unis par W. E. LANE sur les grands fleuves américains ont été très décevants.

Il reste donc, on le voit, aux hydrauliciens un très large champ de recherches avant que la similitude du débit solide en charriage et en suspension ne soit établie sur des bases quantitatives certaines. Mais il est incontestable que, dans ce domaine, le Laboratoire d'Hydraulique est un instrument indispensable au progrès de nos connaissances.

2^o Transports solides provoqués par la houle.

S'il reste encore bien à faire pour élucider complètement le mécanisme du transport des matériaux par les courants, que dire de l'action de la houle ?

Il s'agit là en effet de phénomènes dont l'analyse et l'observation détaillée sont particulièrement difficiles. On s'est contenté la plupart du temps jusqu'ici d'observer les conséquences indirectes globales. Cependant, certaines données ont pu être acquises par la voie expérimentale, en particulier par BAGNOLD, qui a étudié en canal l'action de la houle sur une plage de sable, en essayant de relier les différents paramètres du phénomène (amplitude de la houle, diamètre des grains, profondeur, pente...).

Par ailleurs, les conditions de formation des ripplemarks et des riddens n'ont jamais été complètement élucidées. Il est clair que l'expérience de Laboratoire, en permettant de faire varier les paramètres en cause les uns après les autres, est la seule méthode susceptible d'apporter du nouveau sur ces problèmes abandonnés trop longtemps à l'observation qualitative.

Naturellement, on sent bien que le travail de l'expérimentateur devra toujours être confronté avec l'observation des phénomènes naturels. Malheureusement, celle-ci présente dans le cas d'espèce de grandes difficultés. C'est ainsi que la mesure des concentrations en matériaux en suspension, relativement aisée quand il s'agit d'écoulements de vitesse moyenne peu variable, pose des problèmes ardues quand la turbulence, provoquant la mise en suspension, a pour origine un mouvement oscillatoire comme la houle, voire même une agitation désordonnée comme le déferlement.

Méthode empirique.

Nous n'avons insisté sur les difficultés de l'étude du « débit solide marin » que pour mieux faire comprendre pourquoi le Laboratoire d'Hydraulique se trouve souvent contraint à un certain empirisme dans ce domaine. Cet empirisme peut cependant, malgré ses insuffisances, donner des résultats brillants. Mais il devient alors bien difficile de parler d'une véritable similitude au plein sens du mot ; celle-ci étant seulement respectée pour les phénomènes purement hydrauliques.

Dans tous les cas, une condition essentielle doit être remplie pour que le modèle ait une signification précise, c'est que l'évolution de la forme des fonds se produise dans le modèle dans les mêmes conditions que dans la nature. C'est ce qu'on appelle l'étalonnage du modèle. Les études de ports offrent à cet égard une grande variété d'exemples. Leur but consiste à déterminer d'avance comment la réalisation d'un ouvrage transformera l'évolution naturelle des profondeurs. La première précaution à prendre c'est donc de vérifier que, dans les conditions naturelles, les fonds évoluent bien dans le modèle comme dans la nature; pour faire correctement cette vérification, le Laboratoire doit disposer de levés des fonds échelonnés dans le temps; il aura ainsi l'avantage de déterminer l'échelle des temps de l'évolution des fonds, en comparant leur durée dans la nature et dans le modèle. Il pourra également, dans certains cas, accélérer les durées d'étalonnage en reproduisant une intervention humaine telle que la construction ou la destruction d'un ouvrage, et en suivant sur le modèle les conséquences de cette intervention.

Il en fut ainsi en particulier sur le modèle établi en 1933 au Laboratoire d'Hydraulique du professeur THIJSSSE à Delft, en vue de la percée du cordon lagunaire qui sépare le golfe de Guinée de la lagune d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Ce cordon littoral est une langue de sable grossier en état d'équilibre dynamique sous l'action de la houle oblique. On a évalué à 1 500 000 m³ le volume de matériaux qui défile chaque année sur l'estran. Or, en 1934, la Direction des Travaux Publics de la Côte d'Ivoire eut l'occasion, profitant du niveau anormalement élevée de la lagune, dû à de grosses crues des fleuves côtiers qui y débouchent, de réaliser presque sans frais une percée de ce cordon littoral. Cette percée s'élargit rapidement sous l'action des violents courants de vidange et se referma progressivement, sans intervention humaine, sous l'action du charriage côtier. La reproduction sur le modèle de l'évolution de cette percée éphémère est le type même de ces étalonnages qui permettent au praticien d'accorder sa confiance aux « réponses » que le modèle donnera par la suite aux questions qui lui seront posées.

CONCLUSION

Nous avons passé en revue au cours de cet exposé trop schématique les diverses catégories de problèmes que l'Océanographie peut poser au Laboratoire d'Hydraulique. Nous n'avons pas caché que, s'il existe des questions bien connues, d'autres constituent encore un champ de recherches presque vierge. Et c'est pourquoi, quand il se heurte à des difficultés souvent insurmontables dans l'interprétation de ses observations, en raison de l'intervention simultanée de paramètres trop nombreux, l'Océanographe doit penser que peut-être il

trouvera, auprès de l'expérimentateur, la clef du problème dont il poursuit la solution. Inversement, le Laboratoire ne doit pas oublier que ses travaux puisent leur véritable valeur dans une confrontation constante de leurs résultats avec les phénomènes naturels.

C'est donc à un travail en commun qu'il faut convier à la fois le théoricien, l'Océanographe qui navigue et l'hydraulicien de Laboratoire.

13.177-3-52

ARRAULT ET C^{IE}

— TOURS (France) —

Dépôt légal : 1^{er} trim. 1852

(Reproduction interdite)

Le Gérant : V. ROMANOVSKY