

Chapter 17

LA REPRESENTATION DES PHENOMENES MARINS SUR MODELES REDUITS

par H. GRIDEL

Directeur du Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou

Bien qu'il y ait déjà plus de cent ans que les hydrauliciens expérimentent sur des modèles réduits pour l'étude d'aménagements industriels et que depuis près de vingt ans les problèmes d'hydraulique maritime occupent une part importante de leur activité, on est obligé de convenir que, sauf en ce qui concerne les appareils de mesure, déjà en grande partie normalisés, le matériel expérimental utilisé par les Laboratoires d'Hydraulique conserve encore très souvent un caractère vraiment artisanal.

En particulier en ce qui concerne les études d'hydraulique maritime, le matériel destiné à reproduire les phénomènes naturels de houles, marées et courants est presque toujours établi spécialement pour chaque essai; il n'est pas étonnant dans ces conditions que, conçu pour répondre aux besoins d'un cas particulier, il ne puisse, une fois l'essai terminé, trouver de réemploi et doive être précocement réformé.

On comprend alors que dans l'incertitude de réutilisations proches il soit souvent conçu et établi avec la plus stricte économie, ce qui conduit parfois d'une part à une réalisation un peu trop schématique des données à reproduire et d'autre part à une limitation étroite de la gamme des phénomènes qu'il peut représenter.

Lorsque nous avons eu à équiper notre Laboratoire qui, de par sa nature d'Institution Officielle jouit d'un très net caractère de pérennité, nous avons été amenés à examiner non seulement les aspects techniques de la question, mais également ses incidences économiques. Il nous est apparu alors qu'à ce double point de vue, la recherche de la polyvalence pour l'appareillage utilisé en hydraulique maritime était un élément qu'il n'était plus raisonnable de négliger.

Si en effet un appareillage standardisé et polyvalent est plus onéreux à établir qu'un outillage établi spécialement pour les seuls besoins d'un essai déterminé, par contre, il présente dans l'immédiat le double avantage d'élargir le champ d'investigation des ingénieurs sur une même étude en permettant d'expérimenter sur une bande plus étendue de phénomènes qu'on ne l'avait envisagé de prime abord, et, parce que plus étudié, d'assurer une réalisation plus soignée des phénomènes naturels à reproduire; d'autre part, du fait de réemplois assurés, il est finalement au bout de très peu de temps un facteur d'économie de matériel, de temps et d'argent.

C'est pour ces diverses raisons que nous avons étudié et que nous disposons maintenant au Laboratoire National d'Hydraulique d'appareils entièrement standards permettant de réaliser toutes les gammes de houles nécessitées par les études sur modèle, tous les types de marnage et toutes les combinaisons de courants, avec possibilité de combiner entre eux les appareils de façon à réaliser en même temps dans une même étude : houles, marées et courants.

Un équipement de ce genre étant, nous semble-t-il, assez peu fréquent, il nous a semblé intéressant d'en donner ici une description sommaire.

GENERATEURS DE HOULE

Les conditions de base que nous nous sommes imposées pour la réalisation des générateurs de houle sont les suivantes :

- La période de la houle expérimentale doit pouvoir être réglée de façon continue de 0,25 (1) à 200 secondes avec une précision et une stabilité du 1/500^e. En outre, on doit, si on le désire, pouvoir faire fluctuer à la demande la période autour d'une valeur fixée.
- L'orientation doit être réglable dans toutes les directions sans nécessiter d'opérations mécaniques de fixation des générateurs à la cuve expérimentale, ce qui conduit à un appareillage monté sur un bâti monobloc amovible.
- La profondeur d'eau dans laquelle il est possible de créer la houle doit pouvoir atteindre au moins 0,60 m.
- Le front de houle à réaliser doit pouvoir être étendu à la demande, en juxtaposant autant d'éléments générateurs identiques qu'il sera nécessaire, qu'il s'agisse de fronts de houle rectilignes ou curvilignes, ou même de plusieurs houles synchrones de directions différentes, comme cela se produit lorsque la houle est diffractée par une île ou un ouvrage important.
- Le générateur doit pouvoir produire une houle aussi dénuée d'harmoniques que possible tout en laissant la possibilité de permettre la superposition de deux houles de même direction, mais de périodes différentes.
- L'amplitude des mouvements horizontaux doit pouvoir être réglée de 0 à 60 centimètres
- L'amplitude de la houle doit pouvoir être modifiée et réglée en marche

(1) En dessous de cette période les effets de la tension superficielle deviennent prépondérants sur ceux de la gravité, si bien que la houle produite ne peut plus être considérée comme une houle gravitaire.

- Enfin, la sécurité d'exploitation implique que les générateurs soient composés d'éléments standards de caractère industriel, de façon à réduire les dépenses d'établissement et les temps d'entretien.

Pour mener à bien ce programme, nous avons réalisé des blocs générateurs standardisés chacun comme suit (fig. 1 et 2).

La houle est engendrée par le mouvement d'un volet très rigide en aluminium fondu et nervuré de 3 m de longueur et 0,40 m de hauteur, capable de recevoir des hausses additionnelles pouvant porter sa hauteur totale jusqu'à 0,60 et même 0,80 m.

Le mouvement du volet est commandé en deux points en bas et en haut; au pied, par l'intermédiaire d'un châssis tubulaire de faible inertie solidaire du bâti de l'appareil et, en tête, au moyen d'une tige dont la partie haute est reliée par une coulisse avec un maneton décrivant d'un mouvement uniforme une trajectoire circulaire.

Ces deux organes de transmission sont en liaison avec un plateau épais et creux dont une face porte le maneton engendrant le mouvement circulaire supérieur et l'autre une coulisse créant le mouvement sinusoïdal de pied : l'intérieur du plateau comporte des masses d'équilibrage et les dispositifs de réglage d'amplitude des mouvements.

Il en résulte pour le volet un mouvement qui combine :

- une translation $\rho = r \cos \omega t$
- une rotation $\text{tg } \alpha = \frac{(R - r) \cos \omega t}{H + R \sin \omega t}$

conditions nécessaires, on le sait, pour réaliser un mouvement de houle quelconque (fig. 3).

On voit qu'à la distance moyenne h au-dessus du fond la trajectoire décrite par un point du volet sera une ellipse dont les demi axes sont :

- grand axe $a = r + (R - r) h/H$
- petit axe $b = R h/H$

Si, d'autre part, on se reporte aux équations paramétriques des orbites de la houle naturelle, on sait que ces équations sont :

- au fond $x_f = m \cos \omega t / \text{sh } kh$ $y_f = 0$
- en surface $x_s = m \cos \omega t \text{ ch } kh / \text{sh } kh$ $y_s = m \sin \omega t$

en désignant par ω la pulsation, par k le rapport $2\pi/\lambda$ et par m la demi-amplitude de la houle en surface.

Il en résulte que pour réaliser cette houle, il suffit de régler le générateur de façon que :

$$r = m / \sinh kh \qquad R = m \cosh kh / \sinh kh$$

L'exacte reproduction de y_s n'est complètement assurée que pour les houles en profondeur infinie ou pour les houles de très grande longueur d'onde, mais étant données les valeurs de H au regard des h usuels, l'aplatissement approché de l'ellipse de l'orbite produit par l'appareil n'introduit qu'une très faible proportion de l'harmonique 2. Du reste, un accessoire mécanique simple permet de modifier virtuellement H si cela est jugé nécessaire, sans avoir à toucher les organes fixes du générateur.

Le maneton et l'excentrique réglant les mouvements du volet en tête et au pied sont en principe réglables à l'arrêt; mais un système comportant deux différentiels permet, si on le désire, d'assurer ce réglage en marche, ce qui a l'avantage de permettre en cours d'essais le réglage précis du creux de la houle que l'on veut réaliser et par conséquent d'assurer la répartition de l'énergie désirée sur un front de houle donné.

Lorsqu'il est nécessaire de produire un front de houle étendu, on met autant d'appareils en service qu'il y a de fois trois mètres de front d'onde à réaliser. C'est ainsi que nous avons pu réaliser un front de 78 mètres (avec 26 générateurs) sans pour cela voir apparaître les inconvénients dus aux battements longs habituels (torsion de l'arbre moteur - flexibilité des volets donnant une houle longitudinale, etc...).

Mais comme les générateurs ne sont pas liés mécaniquement, il est nécessaire d'en assurer la synchronisation absolue. Pour réaliser cette synchronisation, on a utilisé un dispositif électronique analogue à celui qui sert sur certains navires de guerre à la mise en direction des canons à partir d'un poste central de tir (fig. 4).

D'une part, un poste pilote (P) actionne avec la précision en fréquence désirée ($> 1/500$) un groupe de selsyns et une dynamo tachymétrique. Cet ensemble est entraîné par un moteur contrôlé par des thyatron, le réglage de la période se faisant par simple action sur un potentiomètre de réglage.

D'autre part, l'arbre de commande de chaque générateur comporte un selsyn qui lui est lié mécaniquement de façon rigide.

Lorsqu'un selsyn conduit se trouve décalé par rapport au selsyn pilote, il en résulte une tension de déséquilibre qui, par l'intermédiaire de relais électroniques de commande, agit sur le servomoteur de réglage du mouvement moteur du générateur correspondant.

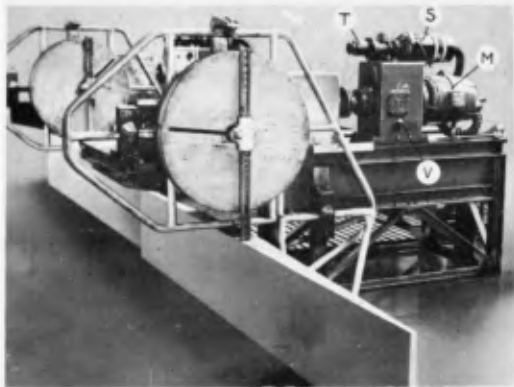


Fig. 1

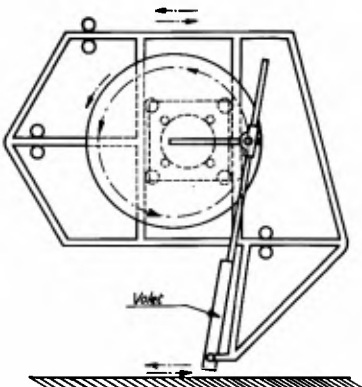


Fig. 2

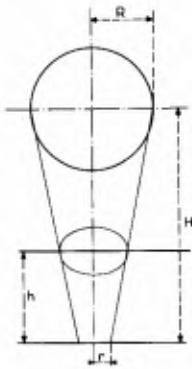


Fig. 3

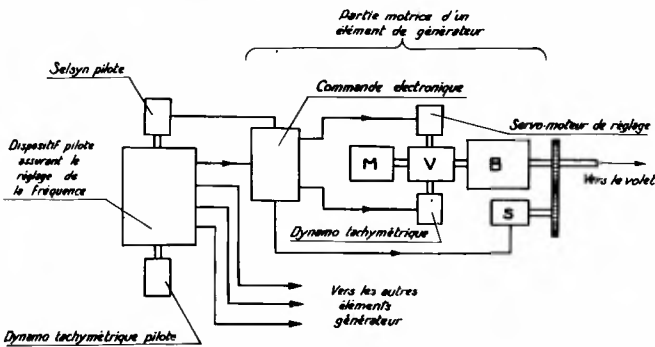


Fig. 4



Fig. 5

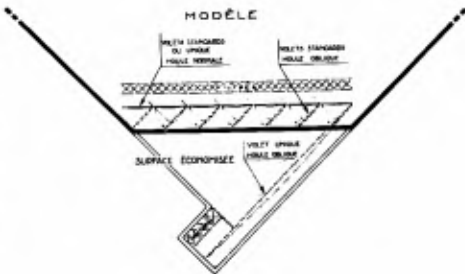


Fig. 6

L'usage nous a montré l'excellence du fonctionnement de ce dispositif qui assure la synchronisation des appareils dans le temps et dans l'espace sans aucune difficulté. Reste à préciser comment ce dispositif est réalisé pratiquement.

La transmission du mouvement aux générateurs est produite comme suit (fig. 1 et 4).

Un moteur asynchrone triphasé de 5 ch - 1.450 t:mn (M) fournit la puissance et le mouvement brut de l'installation : la marche de ce moteur strictement industriel, est en effet influencée par les variations de tension et de fréquence du réseau, la puissance appelée, etc... ce qui fait que sa vitesse de régime n'est pas absolument régulière.

Ce moteur attaque un variateur de vitesse à plateaux (V) qui fournit une démultiplication continue dans le rapport 1 à 10 par déplacement entre les plateaux de galets en forme de troncs de cônes (ce qui évite tout glissement). Un servomoteur (S) et une dynamo tachymétrique (T), qui fournit la dérive de l'écart de marche avec le pilote, agissent sur le galet pour régler à tout instant la période du mouvement à la sortie de l'appareil, c'est à dire en pratique la vitesse de rotation à la sortie du variateur.

Outre la possibilité de régulation du mouvement, le variateur donne déjà la faculté de régler la période de la houle dans la gamme 1 à 10 : par ailleurs, il existe une boîte à trois vitesses (B) dans les rapports 1 - 9 - 80; celle-ci, combinée avec le réglage continu, permet donc de régler la période dans le rapport 1 à 800, ce qui compte tenu des pignons en jeu donne finalement pour la houle expérimentale un réglage de 0,25 à 200 secondes. A noter que pour permettre le jeu du dispositif de régulation, il y a aux deux extrémités de chaque gamme de vitesse des plages de recouvrement avec les vitesses voisines.

En raison de l'étendue du domaine des périodes que l'appareil peut réaliser, on a ainsi la possibilité d'étudier, sur tous les modèles, les ouvrages non seulement avec les houles naturelles même très courtes, mais également avec les houles très longues, ce qui permet, en conclusion de chaque étude de port, la recherche de toutes les seiches possibles capables d'apparaître par accord de résonance des bassins avec la houle excitatrice.

Si par exemple on a construit un modèle au 1/200, l'échelle des temps étant 1/14,14, le générateur permet de passer de façon continue la gamme de houles naturelles allant de 3,5 secondes à 46 minutes, ce qui est nettement surabondant dans tous les cas que nous avons eus à étudier.

On conçoit par ailleurs qu'en agissant de façon appropriée sur le réglage du selsyn pilote, on puisse imposer aux générateurs des mouvements qui correspondent à la superposition de deux houles de périodes différentes mais de

direction identique. Enfin, des déphasages entre les divers batteurs peuvent permettre l'étude de houles à front discontinu (short - crested waves).

Reste la question de l'orientation de la houle : celle-ci est très facilement obtenue, puisque chaque ensemble est supporté par un bâti indépendant du fond du modèle, en changeant l'orientation des bâtis des générateurs qui au lieu d'être en ligne se trouvent placés en dents de scie. Pour raccorder entre eux les éléments de crêtes de houle produits par chaque appareil, il suffit d'agir sur le calage des selsyns des générateurs, ce qui s'obtient par un décalage de leur stator par rapport au bâti. On a prévu en outre des flasques en tôle d'acier évitant l'expansion latérale de la houle produite jusqu'à ce que celle-ci se raccorde avec celle engendrée par le générateur voisin. La figure 5 montre une batterie de générateurs en telle position sur un modèle portuaire. Noter l'économie de surface du modèle que ce dispositif de génération de la houle permet par rapport à celle nécessitée par un volet unique de grande longueur que l'on fait pivoter pour changer la direction (Fig. 6).

Comme on le voit, la polyvalence recherchée pour produire toutes les houles qui peuvent être nécessaires dans un laboratoire a bien été obtenue. Il n'est pas sans intérêt de signaler ici que, si le matériel ainsi réalisé a représenté une mise de fonds importante, celle-ci a pu être récupérée très rapidement : ajouté à la qualité de la houle produite (minimum d'harmonique - stabilité de la période-large gamme d'emploi), ce résultat nous semble très digne de retenir l'attention des techniciens, car très souvent ceux-ci étaient amenés à renoncer - pour de petits ports en particulier - à l'exécution de modèles en raison du prix élevé des installations de base nécessaires, parmi lesquels les appareils à houle entrent pour une part très importante.

GENERATEURS DE MAREES

Sauf dans le cas de modèles à échelle extrêmement réduite, ou à très forte distorsion, où l'emploi de dispositifs plongeurs est seul possible, le procédé généralement employé pour réaliser les lois de marées sur les modèles consiste à introduire dans ceux-ci un débit connu, constant ou variable, très surabondant, et à effectuer par ailleurs de façon continue une vidange appropriée. Quand cette vidange est moins importante que l'introduction d'eau, le niveau monte et on représente le flot. Lorsqu'elle est plus forte, le niveau descend et on reproduit ainsi le jusant.

Pratiquement la loi que l'on veut réaliser est matérialisée par un équipage actionné par une came mécanique et la loi effectivement obtenue par un flotteur; des contacts électriques appropriés entre équipage et flotteur actionnent convenablement les organes électriques réglant automatiquement la loi de vidange.

Le dispositif, satisfaisant pour les petits marnages ou sur des modèles de petite surface, ne convient plus sur les grands modèles, car en effet le réglage du vannage de vidange "par tout ou rien" provoque des "pompages" inadmissibles avec fluctuations corrélatives des niveaux et des courants.

Pour réaliser un appareil d'emploi universel, nous nous sommes attachés à lui faire remplir dans le cadre du schéma ci-dessus les trois conditions supplémentaires suivantes, dont la nécessité est montrée dans un article cité en référence :

- Réaliser un réglage du vannage progressif, c'est à dire qui soit une fonction continue de l'écart entre les lois réalisée et à réaliser.
- Supprimer l'usage d'une came mécanique qui risque d'introduire des erreurs par l'imprécision de son tracé et qui ne permet pas d'effectuer de façon continue n'importe quel cycle périodique de marée croissante et décroissante, si le caractère des essais le requiert.
- Enfin, assurer une compensation automatique des retards hydrauliques, permettant de comparer la loi de niveau imposée non pas avec la marée effectivement obtenue sur le modèle, mais avec la loi qui y sera réalisée quelques instants plus tard en fonction d'un décalage de temps préétabli, ceci pour assurer la compensation des temps de propagation des niveaux entre le point où ceux-ci sont mesurés et l'endroit où ces niveaux sont réglés par la vanne de vidange.

L'appareillage qui répond à ces trois desiderata comporte les dispositifs décrits ci-après :

REGLAGE PROGRESSIF DU VANNAGE (Fig. 7)

Le détecteur de niveau, au lieu d'être un flotteur, est un appareil à pointe vibrante. Ce détecteur, décrit in extenso dans un article signalé en référence, fonctionne de la façon suivante : une fine aiguille métallique verticale est fixée sur un équipement électrodynamique qui la fait vibrer verticalement à une fréquence de l'ordre de 50 par seconde. En contact avec l'eau par sa pointe, elle constitue un interrupteur qui laisse passer un courant électrique tant qu'elle est dans l'eau et le coupe lorsqu'elle est hors d'eau : on conçoit que la quantité de courant qui traverse le circuit étant fonction de la position relative de la surface liquide et du vibreur, si celui-ci est astreint à suivre la loi de marée imposée, le courant qui traversera la pointe est de façon continue fonction de l'écart avec le niveau réalisé à chaque instant.

Ce courant est envoyé dans un amplificateur monté en pont de Wheatstone dans la diagonale duquel est placé un petit moteur à très faible inertie : la vitesse du moteur et son sens de rotation sont fonctions de la valeur et du sens de l'écart entre les niveaux voulus et réalisés.

Le moteur - de quelques watts de puissance - agit par une transmission appropriée sur une vanne du type segment, très légère et bien équilibrée, placée au fond de la cuve du modèle assez bas pour qu'il existe sur l'orifice une charge notable : par cette chaîne de mécanismes très simples, on réalise ainsi

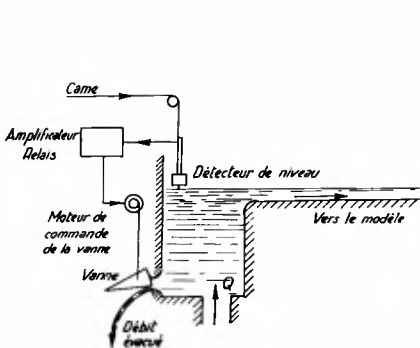


Fig. 7

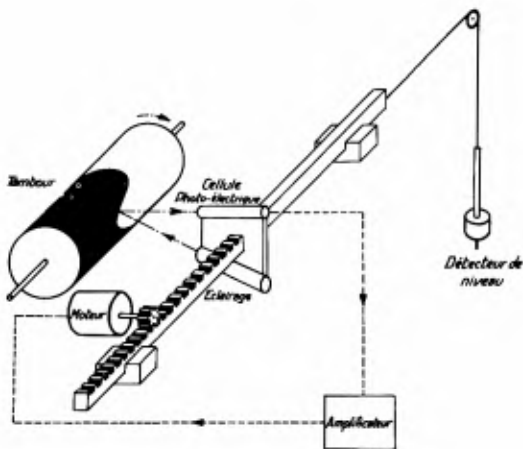


Fig. 8

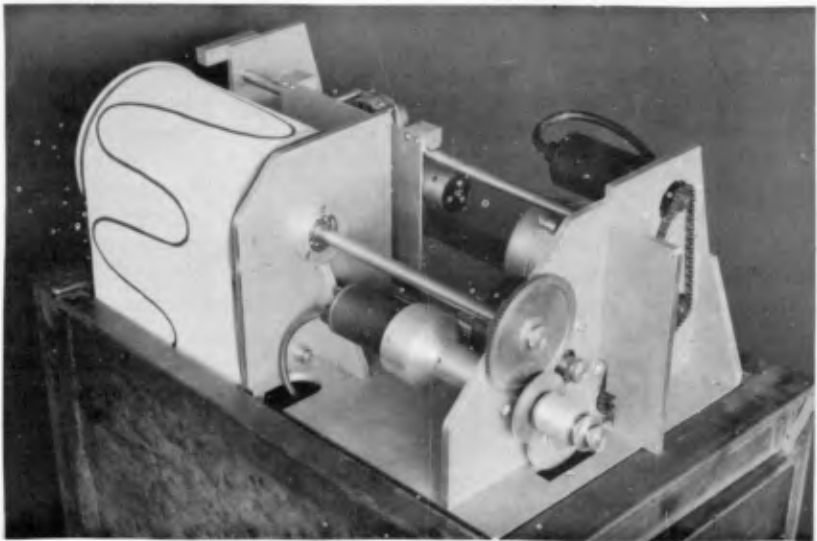


Fig. 8 bis

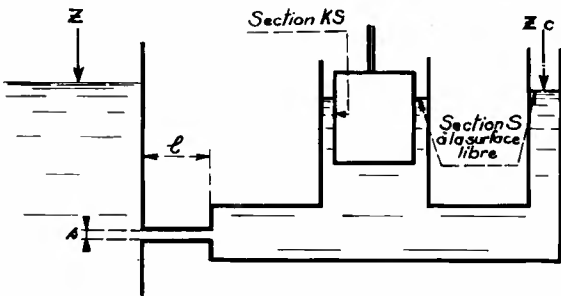


Fig. 9

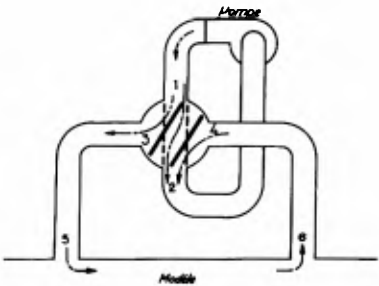


Fig. 10

une loi de mouvement de la vanne fonction de l'écart de réglage du niveau, ce qui est le but recherché.

Dans la pratique la précision obtenue sur celui-ci est de l'ordre de 1/10 mm et, le réglage étant continu, on n'observe aucun phénomène de pompage : nous en avons fait l'observation sur un modèle de plus de 1.500 m² de surface où le débit évacué atteignait 500 l/s, ce qui en cette matière constitue très certainement un record de difficulté.

CAME OPTIQUE (Fig. 8 et 8 bis)

La matérialisation de la loi de niveau sans came mécanique est de son côté réalisée de la façon suivante :

La loi de marée est tracée en coordonnées cartésiennes sur une bande de papier blanc se déroulant de façon uniforme, de telle façon qu'elle partage cette bande par exemple en une plage blanche à sa droite et une plage noire à sa gauche.

Un spot lumineux vibrant et très fin est produit par un dispositif optique approprié (source lumineuse ponctuelle - très fine fente objet - optique de bonne définition) monté sur un chariot qui se déplace parallèlement à la bande et perpendiculairement à son sens de déroulement : une cellule photoélectrique solidaire du chariot reçoit la lumière diffusée par le papier.

Lorsque le spot est sur la plage blanche, la diffusion est maxima, et elle est minima quand il est sur la plage noire. Le courant produit par la cellule a la forme de créneaux dont la longueur relative est fonction de la position de la limite de la plage noire par rapport au point milieu de la vibration du spot. Ce courant agissant après amplification sur un moteur commandant les mouvements du chariot, il en résulte que celui-ci ajuste à chaque instant sa position sur le tracé de la loi de marée qui se trouve ainsi matérialisée de façon très précise : un renvoi par fils et poulies - ou si on le désire par selsyns - transmet le mouvement à la tête vibrante décrite ci-dessus.

Les avantages du dispositif optique que nous venons de décrire par rapport aux cames mécaniques usuelles sont les suivants :

- 1) Possibilité de réaliser, dans leur enchainement naturel, tous les cycles de marée que l'on désire par le simple déroulement de la courbe appropriée.
- 2) Rapidité de reproduction de la loi désirée par simple tracé graphique. Possibilité d'effectuer sur la bande établie des corrections dans les deux sens à l'aide d'encre de chine ou de peinture blanche à la gouache.

- 3) Réalisation de la loi en coordonnées cartésiennes tandis que les cames mécaniques doivent être généralement transformées en coordonnées pseudo-circulaires, ce qui introduit des erreurs au traçage des gabarits.
- 4) Economie de temps et de dépenses par rapport à l'usinage des cames mécaniques.

CORRECTEUR D'ECART

Restait, pour rendre universel l'emploi de l'appareil, à résoudre le problème de la correction des retards hydrauliques de transmission.

En effet, même en admettant - ce qui n'est pas toujours le cas - que la vanne de vidange est placée au voisinage d'un endroit qui est le point homologue de celui où, dans la nature, on dispose d'un poste marégraphique, condition optima pour avoir une réponse hydraulique rapide, il peut arriver que sur un modèle on soit amené à représenter simultanément la houle et la marée : dans ce cas pour détecter le niveau de marée réalisé dans le modèle en éliminant les fluctuations rapides de niveau provoquées par la houle, on est amené à établir un filtre hydraulique passe-bas qui élimine ces fluctuations dans un puits de contrôle. Mais on sait que dans ce cas, un effet parasite du filtrage est de provoquer un retard entre la loi de niveau à l'intérieur du puits de mesure et la loi du niveau extérieur, retard qui est fonction de la capacité de filtrage du dispositif : il faut compenser ce retard systématique par une avance correspondante si on veut que le vannage de marée fonctionne sans hystérésis.

Nous avons résolu ce problème au moyen du dispositif suivant (Fig. 9) :

Le puits de mesure, de section S , est relié au modèle par un tube fin T de section s et de longueur l : l'ensemble est complété par un puits auxiliaire dans lequel un plongeur mobile peut provoquer des variations de volume de façon telle que sa section équivalente soit $K S$.

On donne au plongeur la loi de mouvement suivante, en relation avec la loi de marée $Z(t)$ et le niveau $z(t)$ dans le modèle :

$$Z(t) - (K - 1) z(t) / K$$

Si K est assez grand par rapport à 1, on a dans le puits S une loi de niveau $z_c(t)$ en avance d'un temps constant par rapport à $z(t)$.

L'appareil se comporte comme un montage électrique avec self et capacité donnant une avance de phase à l'écart de réglage. Si e_c est l'écart corrigé et e l'écart initial, on a :

$$e_c = e + R \, de/dt + L \, d^2e/dt^2$$

avec

$$R = \frac{1}{g} \frac{8 \pi \nu}{s} \frac{K S}{s} \quad L = \frac{1}{g} \frac{K S}{s}$$

où g est l'accélération de la pesanteur et ν la viscosité cinématique de l'eau.

En agissant sur les valeurs constructives de l'appareil on peut donc compenser le retard provoqué par l'effet de filtre du dispositif. C'est ainsi que sur un modèle nous avons pu réaliser une correction de plus de 10 secondes, nécessitée par la filtration de la houle et la distance importante séparant la vanne du réglage du point où la marée était connue.

Il va de soi que tous les modèles à marée d'hydraulique maritime ne nécessitent pas un appareillage aussi complet que celui décrit ci-dessus. En particulier l'usage du correcteur ne se justifie que lorsqu'il est nécessaire de représenter à la fois la houle et la marée : il nous a toutefois paru utile d'en signaler ici l'existence car il résout de façon complète un problème qui, jusqu'à présent, à notre connaissance n'avait encore jamais été abordé.

Il va de soi par contre que si un modèle est réalisé de façon telle que l'on doive y faire intervenir deux lois de marées (comme ce fut le cas par exemple sur le modèle du canal du Cap Cod étudié avant la guerre par le Laboratoire du Massachusetts Institut of Technology), il faut avoir recours à deux installations à marée comportant chacune : circuit d'alimentation, vanne de vidange, détecteur de niveaux et came optique.

REALISATION DE COURANTS DE MAREES

La réalisation partielle sur les modèles du bassin géographique intéressé par la marée en un lieu fait que bien souvent - pour ne pas dire toujours en dehors du cas des estuaires - la bonne représentation de la loi de variation des niveaux ne donne pas pour autant la représentation correcte des courants correspondants. Au reste il arrive parfois que dans la nature même il existe en un lieu des courants qui ne sont pas uniquement dépendants de la marée locale. Le problème se pose alors aux expérimentateurs d'ajouter artificiellement aux courants produits sur la maquette par la loi des hauteurs de marnage déjà réalisée des courants complémentaires et ceci sans que cette adjonction modifie la loi de niveau précédemment réglée, cet ajustement devant se faire d'ailleurs de façon empirique en faisant coïncider par tâtonnements successifs les lois de courants relevées dans la nature avec les mouvements observés sur le modèle.

Le problème peut évidemment être résolu au moyen de pompes volumétriques à débit variable qui prélèvent du débit en un point approprié de la maquette et le restituent en un autre point. Cependant le prix élevé de telles machines, surtout quand les débits en jeu sont importants, rend ce dispositif économiquement prohibitif : en outre la lubrification de telles pompes, quand elles ne véhiculent que de l'eau, pose également des problèmes délicats.

La solution que nous avons réalisée consiste à utiliser une pompe centrifuge normale en lui adjoignant un distributeur spécial.

La figure 9 montre le fonctionnement de ce montage. On voit que lorsque le tuyau à section carrée constituant le registre tournant R du distributeur vient dans l'alignement des orifices 1 - 2, la pompe débite sur elle-même et que les circuits 3-5 et 4-6 sont sans débit.

Au contraire, quand le registre R est écarté de la position 1 - 2, la pompe aspire partiellement d'un côté et refoule de l'autre : d'ailleurs en inversant par rapport à l'axe 1 - 2 la position du distributeur, on inverse le sens du courant. Il en résulte qu'en modifiant la position du distributeur on peut réaliser, dans la limite du débit Q maximum dépendant de la capacité hydraulique du dispositif, une variation continue du débit allant de $+Q$ à $-Q$ en passant par la valeur zéro pour la position milieu du registre.

En disposant en 3 et 4 devant les orifices du distributeur des gabarits de forme appropriée, on peut agir sur la loi reliant le débit à la position du registre et rendre cette dernière très simple, par exemple linéaire.

On peut également asservir la loi de débit à une loi préétablie à l'aide d'une came appropriée.

Enfin, si les courants aux débouchés 5 et 6 des conduites dans le modèle varient non seulement en intensité mais en direction dans le temps, on peut y disposer des aubages dont les mouvements sont assujettis à suivre une loi cyclique convenable.

CONCLUSION

Au cours de cet exposé, nécessairement très sommaire, nous n'avons pas pu nous étendre sur les détails techniques de réalisation des appareils décrits et nous nous sommes bornés à indiquer les données qui ont été à la base de la conception de ces matériels.

Nous sommes volontiers à la disposition de tous ceux que les détails de construction de notre appareillage pourraient intéresser pour leur fournir les indications qu'ils pourraient désirer dans cet ordre d'idées.

Signalons en terminant, pour nous mettre en règle avec la réglementation française des Brevets d'Invention, que pour tout ou partie, certains de ces dispositifs sont protégés en France et dans certains Pays Etrangers par divers brevets.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Biesel F. et Suquet F. (1951 et 1952) Les appareils générateurs de houle en laboratoire (La Houille Blanche 2 - 4 - 5 - 1951 et 6 - 1952)
- Valembois J. (1950) Etude d'un appareil permettant la reproduction de l'onde marée dans un modèle d'estuaire (La Houille Blanche - n° spécial B - 1950)
- Gridel H. (1950) La mesure précise et l'enregistrement des niveaux stables ou fluctuants au moyen de pointes limnimétriques à vibrations entretenues. (La Houille Blanche - n° spécial B - 1950)

RESUME

THE GENERATION OF WAVES, TIDES AND CURRENTS IN MODELS

H. Gridel

The author describes the technique and apparatus used at Chatou for the generation of waves, tides and currents in models of hydraulic structures.

(1) Generation of waves

To generate waves in models without loosing space or increasing the duration of experiments, the apparatus must be adapted to the following requirements:

- a. the movements of water must be reproduced with a good approximation,
- b. the period of the generated waves must be adjusted with an excellent precision (especially for the reproduction of seiche phenomena),
- c. it is necessary that the wave height, period and phase can be adjusted during operation of the generator,
- d. the wave generators must be made of standard elements, electrically synchronised.

The apparatus designed and built at Chatou is perfectly adapted to these requirements and has proved to be very easy to operate.

(2) Generation of tides

The tide models at Chatou are controlled by an automatic apparatus for the regulation of water level, which operates as follows:

A constant or variable discharge is introduced at the downstream end of the model, a variable discharge being evacuated by a sector gate designed to require very small power to be operated. A level detector with a vibrating needle measures the difference between the actual and the required water level and actuates, by means of an electronic relay, the motor of the gate.

The precision of the level detector and its continuous action yield to a precision of 1 to 2 tenths of a millimeter in the regulation of the water level. The cam controlling the up and down movement of the detector is drawn on a graph and followed by a photoelectric device. With this type of cam, one can realize a complicated cycle of tides very rapidly and at small cost. The precision obtained is very good.

If the design of the model is such that it yields to hydraulic time differences inducing instability, they are compensated by a hydraulic device introducing the first derivative of the water level difference.

(3) Generation of currents

It is sometimes necessary in a model to superimpose currents independently of the level variations, for instance in a model reproducing a small portion of an estuary. The Laboratory has designed an apparatus which permits restitution in a section of the model of the discharge taken at another section. It is a hydraulic analogy to the wheatstone bridge.