Les appareils générateurs de houle en laboratoire

Laboratory wave generating apparatus

POINT DE VUE DE L'UTILISATEUR

FROM THE USER'S VIEWPOINT

PAR UN GROUPE D'INGÉNIEURS DU LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE NEYRPIC

(Cf. la Houille Blanche 1951 : n° 2, p. 147; n° 4, p. 475; n° 5, p. 723)

Dans deux articles, parus dans cette Revue, étaient présentées, d'une part une théorie des appareils générateurs de houle en Laboratoire. et d'autre part une étude sur les conditions auxquelles devaient satisfaire ces appareils au point de vue de leur construction et de leur mouvement. Dans le présent article, un groupe d'ingénieurs, du Laboratoire d'Hydraulique NEYRPIC, expose comment ils se sont efforcés de satisfaire aux exigences énoncées précédemment. Pour illustrer cette doctrine, les auteurs décrivent trois installations d'étude de houle ou de problèmes portuaires, à buts très différents, réalisées dans leur Laboratoire. Ils terminent en indiquant les perfectionnements qu'ils envisagent dans la conception et la construction des appareils générateurs de houle, perfectionnements dont la plupart ont déjà été essayés sur des prototypes.

Two articles, published in this journal, presented first of all the theory of laboratory wave generating machines and secondly, a study of the conditions which these machines should fulfill both in their construction and in their movement. In the present article, a group of engineers of the NEYRPIC Hydraulics Laboratory tell how they endeavoured to comply with the requirements mentioned previously. By way of illustration, the authors describe three of their laboratory's installations for the study of waves or of harbour problems, the aims of each of these installations being entirely different. They end by mentioning the improvements they intend to make to the design and construction of wave generating machines, most of these improvements having already been tested out on prototypes.

Sommaire

I. — PROBLÈMES DE MOUVEMENT.

- 1° Loi du mouvement dans le temps.
- 2° Loi du mouvement dans l'espace.
- 3° Constance de la période.

II. — PROBLÈMES DE CONSTRUCTION.

- 1° Inertie.
- 2° Frottements.
- 3° Entretien.
- 4° Réflexion.
- 5° Réglage.
- 6° Mobilité.

III. — AUTRES PROBLÈMES.

- 1° Conservation de l'amplitude.
- 2° Diffraction.
- 3° Houle irrégulière.
- 4° Variation de l'amplitude le long de la crête.

5° Seiches et balancements.

6° Régimes transitoires.

IV. — AIDE APPORTÉE PAR LA THÉORIE DANS LES AVANT-PROJETS DE BATTEUR.

V. — QUELQUES RÉALISATIONS

- 1° Canal d'étude de la physique de la houle.
- 2° Bassin d'essai pour houles obliques.
- 3° Bassin pour l'étude de la physique des houles à trois dimensions.
- 4° Résultats obtenus.

VI. — TENDANCES ACTUELLES ET VUES D'AVENIR.

- 1° Loi du mouvement dans le temps.
- 2° Houle irrégulière.

CONCLUSION.

Cet article est le dernier d'une série que nous avons inaugurée dans la Houille Blanche de mars-avril 1951. Comme il était dit dans ce numéro, il avait paru intéressant aux auteurs de faire suivre les articles de MM. BIESEL et SUQUET

par le point de vue des ingénieurs qui ont à réaliser des appareils générateurs de houle et à les exploiter tous les jours sur les modèles; c'est ce point de vue que nous présentons aujourd'hui.

Dans un article paru dans cette revue (1), M. SUQUET avait esquissé une classification des appareils générateurs de houle en laboratoire et indiqué quelques conditions auxquelles ces appareils devaient satisfaire. Cet exposé avait été suivi par une étude théorique de M. BIESEL (2); l'auteur commençait par établir les équations générales régissant la production de la houle au premier ordre d'approximation; il les appliquait ensuite à un certain nombre de batteurs de type simple; il examinait, pour ces cas particuliers, la « qualité » de la houle produite, explicitait les efforts mis en jeu et donnait la relation existant entre le mouvement du batteur et l'amplitude de la houle.

Nous allons maintenant voir comment le Laboratoire d'Hydraulique NEYRUPIC a essayé de répondre en pratique aux différentes exigences énoncées plus haut; nous adopterons la classification de l'article de M. SUQUET, un peu artifi-

cielle certes, mais commode, qui consistait à séparer les « problèmes de mouvement » des « problèmes de construction »; dans un paragraphe « autres problèmes », nous dirons de plus comment nous avons essayé de résoudre certaines difficultés (conservation de l'amplitude, diffraction autour des extrémités du batteur, etc.) qui ne peuvent être résolues en perfectionnant le principe même de l'appareil, mais qui intéressent au plus haut point l'ingénieur d'essais. Nous examinerons ensuite dans quelle mesure les calculs théoriques exposés par M. BIESEL peuvent aider l'ingénieur chargé de faire l'avant-projet d'un batteur. Ces différents points constituent ce qu'on pourrait appeler notre doctrine d'utilisation des batteurs. Celle-ci sera illustrée par la description de deux installations existant dans notre Laboratoire, et suivie d'un aperçu sur les directions vers lesquelles nous croyons devoir pousser nos recherches afin d'améliorer encore les résultats obtenus.

I. — Problèmes de mouvement

1° LOI DU MOUVEMENT DANS LE TEMPS.

Nous renverrons, pour la définition de cette expression, à l'article de M. SUQUET cité plus haut. Les études théoriques montrent qu'en première approximation une telle loi doit être sinusoïdale; nous savons toutefois qu'il serait préférable de donner une loi plus complexe au mouvement du volet, loi que d'ailleurs nous ne connaissons pas encore exactement. Des essais étant actuellement en cours, ce n'est que dans le paragraphe VI (Tendances actuelles et vues d'avenir) que nous traiterons le problème du batteur ayant une loi de mouvement dans le temps, plus approchée que la loi sinusoïdale.

Si donc, on se limite à cette dernière, il apparaît immédiatement des solutions pratiques, mécaniquement simples dont le type est le système bielle-manivelle. On sait en effet que si la bielle est suffisamment longue, à un mouvement de rotation uniforme de la manivelle correspond un déplacement rectiligne sensiblement sinusoïdal du pied de la bielle.

Ce principe a été largement utilisé dans tous les laboratoires ainsi qu'on peut le voir d'après les fiches qui illustrent les articles précédents.

Il ne suffit d'ailleurs pas que la bielle soit assez longue pour que le mouvement du volet soit sensiblement sinusoïdal: il faut également que le mouvement de rotation de la manivelle soit bien uniforme. Or, la vitesse de rotation de la manivelle peut varier pour deux raisons:

— La première est la fluctuation de la fréquence ou de la tension du secteur; nous examinerons plus loin comment on peut en éliminer les effets nuisibles.

— La deuxième est que le couple résistant varie considérablement au cours d'un battement du volet par suite des variations des efforts hydrodynamiques, des efforts d'inertie et éventuellement des résistances passives.

Le remède le plus efficace contre les fluctuations de vitesse de rotation dues au volet consiste à utiliser un volant susceptible d'emmagasiner une énergie cinétique suffisante. En ce qui concerne l'emplacement de ce volant, deux solutions opposées, avec tous leurs intermédiaires, se présentent immédiatement:

— On peut monter le volant sur le moteur; celui-ci tourne en général à grande vitesse; par suite, le volant pourra être peu important. En regard de cet avantage, cette disposition a l'inconvénient de ne faire bénéficier que le moteur de la protection apportée par le volant contre les fluctuations du couple résistant; celles-ci agissent avec leur pleine force sur les engrenages de réduction interposés entre le moteur et la manivelle.

— On peut, au contraire, monter le volant sur l'arbre même de la manivelle, arbre qui, en général, tourne plus lentement; de cette façon, on réduit les chocs et les fluctuations d'efforts dès leur origine et on protège entièrement les mécanismes de transmission dont la durée est ainsi

(1) *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 1951.

(2) *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 1951; n° 4, juillet-août 1951; n° 5, septembre-octobre 1951.

accrue. Par contre, le volant ne peut être efficace que s'il est de très grande dimension étant donné sa faible vitesse de rotation.

Il nous semble que la position du volant doit se décider en comparant la résistance des organes de transmission aux efforts fluctuants

FIG. 1. — Appareil générateur de houle avec volant monté sur l'arbre du moteur.

FIG. 2. — Volant d'un appareil générateur de houle monté sur l'arbre de la manivelle (la bielle a été démontée).

créés par le volet. On peut donc penser que, pour les volets de très grandes dimensions, il sera préférable de mettre un volant sur l'arbre de la manivelle, de façon à ne pas être obligé d'employer des engrenages énormes; pour les volets de petite dimension, on pourra laisser le volant sur l'arbre du moteur ou, tout au moins, sur un arbre tournant relativement vite.

Les figures 1 et 2 montrent deux réalisations des solutions de principe que nous venons de décrire.

2° LOI DU MOUVEMENT DANS L'ESPACE.

L'étude théorique de M. BIESEL a montré que

la loi du mouvement dans l'espace n'est probablement pas aussi essentielle que la loi du mouvement dans le temps pour la création de houles de « bonne qualité ». Cependant, cette étude a également montré que les « pressions d'inertie » croissent beaucoup lorsque la loi du mouvement dans l'espace n'était pas adaptée à la houle créée. Ces pressions d'inertie, souvent considérables, provoquent une fatigue inutile du matériel, des fuites parfois importantes autour du volet et obligent à accroître la résistance, donc la masse des pièces mobiles. Il reste donc souhaitable de pouvoir adapter au moins approximativement la loi du mouvement dans l'espace.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, de nombreux

FIG. 3. — Volet-balance.

laboratoires ont essayé de le faire et ont réalisé des volets animés d'un mouvement horizontal au voisinage du fond. Rappelons qu'une des solutions adoptées par le Laboratoire d'Hydraulique NEYRPI dans ce but est le volet-balance qui, du point de vue de l'exploitation, a l'avantage de ne comporter aucune articulation dans l'eau (fig. 3).

3° CONSTANCE DE LA PÉRIODE.

Nous venons de voir que l'on pouvait supprimer les fluctuations de vitesses dues au volet à

l'aide d'un volant convenablement placé. Il n'en est plus de même pour les fluctuations de vitesse dues à des variations de tension ou de fréquence du secteur. En effet, celles-ci ne sont pas rapides comme les premières (elles peuvent se reproduire à des intervalles de plusieurs secondes ou plusieurs minutes) et sont d'ailleurs apériodiques en général. Il est donc clair qu'un volant normal ne saurait assurer la constance de la période d'un batteur mû par un moteur branché directement sur le réseau.

Or, il est extrêmement important pour la pratique de régler cette fréquence avec une grande précision.

En effet, de faibles fluctuations de vitesse du volet peuvent provoquer des fluctuations importantes de l'amplitude de la houle après une certaine distance de propagation. Il s'agit là d'un phénomène d'instabilité, explicable théoriquement, dont l'existence est certaine.

D'autre part, il ne faut pas oublier qu'un modèle dont beaucoup de parois peuvent être réfléchissantes, possède en général de nombreuses fréquences de résonance souvent très voisines les unes des autres. Si la fréquence de l'appareil générateur de houle passe d'une de ces valeurs à une autre, il peut se produire une modification importante dans la répartition de l'agitation à l'intérieur du port.

Les procédés que nous avons employés jusqu'ici pour réduire les fluctuations de fréquence du volet sont de deux ordres :

a) Nous tablons sur la constance de la fréquence du réseau, en général bien mieux conservée que celle de la tension, en utilisant des moteurs asynchrones nettement surpuissants. Ainsi leur glissement est très réduit et ils tour-

nent presque à leur vitesse nominale. Les fluctuations de tension ont alors pour effet de provoquer des changements relativement importants sur le glissement lui-même, mais négligeables par rapport à la vitesse de rotation du moteur.

Ce procédé donne de bons résultats pour les essais courants étant donné la stabilisation actuelle de la fréquence du réseau; il a l'avantage d'une grande simplicité.

b) Un autre procédé couramment employé consiste à utiliser du courant continu créé par une centrale indépendante. On est ainsi plus facilement maître de la constance de la tension, et, d'autre part, l'emploi d'un rhéostat permet d'obtenir directement sur le moteur des variations de vitesse continues, ce qui permet de se passer de variateurs, très onéreux pour les grandes puissances. D'autres procédés ont été étudiés au Laboratoire NEYRPIC mais, comme ils ne sont pas encore entrés dans la pratique courante des essais, nous n'en parlerons qu'au paragraphe VI : Tendances actuelles et vues d'avenir.

II. — Problèmes de construction

1° INERTIE.

Il est essentiel de réduire l'inertie des volets et, d'une façon plus générale, de toutes les parties oscillantes entrant dans le mécanisme d'un appareil générateur de houle. En effet, ces masses oscillantes sont à l'origine des fluctuations d'effort qu'il est nécessaire de combattre par des volants importants avec tous les inconvénients que cela comporte.

En fait, cependant, il n'est pas toujours nécessaire de réduire à l'extrême limite les efforts d'inertie mécaniques.

Nous savons en effet qu'il intervient d'autres sortes de fluctuations provenant des efforts hydrodynamiques et du frottement; si, au moyen d'une construction convenable, les frottements peuvent être, la plupart du temps, rendus négligeables, les fluctuations d'origine hydrodynamique ne peuvent, par contre, être annulées et restent toujours assez importantes; en effet, elles comprennent, à côté d'une fluctuation « de pression d'inertie » que l'on peut réduire en choisissant convenablement la loi du mouvement du volet, une fluctuation due aux « efforts normaux », inséparable de la production même de la houle.

Les principaux efforts fluctuants restant à considérer sont, en définitive, ceux qui proviennent, d'une part, de l'inertie et d'autre part des efforts hydrodynamiques normaux. Or, les fluctuations de ces deux catégories d'efforts étant en quadrature, la valeur maximum de l'effort résultant est

Fig. 4. — Vue de détail d'un batteur montrant l'arbre creux sur lequel est monté le volet et l'articulation de la bielle sur celui-ci.

la racine carrée de la somme des carrés des efforts maximum composants.

On voit, par conséquent, que l'on n'aura plus intérêt à réduire les efforts d'inertie dès qu'ils seront nettement inférieurs aux efforts hydrodynamiques normaux.

En fait, une conception saine consiste à admettre à peu près le même ordre de grandeur pour ces deux composantes, ce qui nécessite en pratique des volets d'inertie mécanique très réduite. C'est pourquoi, nous avons réalisé la plupart d'entre eux en duralumin et avons adopté, en particulier pour les volets à simple articulation, un mode de construction particulièrement léger consistant à monter la lame de duralumin sur un arbre creux; celui-ci transmet l'effort moteur qui peut être appliqué en un point unique du volet (fig. 4).

Cette utilisation rationnelle de la très grande rigidité de torsion des corps cylindriques creux, a permis de construire des volets de dimensions importantes, susceptibles de créer des houles de grande fréquence sans produire des efforts dangereux dans les mécanismes.

2° FROTTEMENT.

Nous avons dit plus haut que les efforts de frottement pouvaient être rendus négligeables. Ceci n'est vrai qu'à certaines conditions.

Lorsque ces efforts proviennent des articulations, paliers ou autres, nécessaires au mouvement du volet, il suffit, en général, de calculer ces articulations avec des coefficients de sécurité raisonnables pour que les diamètres d'axe auxquels on aboutit soient très faibles par rapport aux bras de levier des efforts agissant sur les pièces. Ainsi, même en cas de grippage de ces paliers, il est rare que les efforts de frottement qui en résultent soient importants. Il n'en est pas de même des frottements provoqués par les étanchéités, dont on peut juger utile d'entourer le batteur pour réduire les fuites qui se produisent entre lui et les parois du canal. Ces étanchéités frottent alors sur presque tout le périmètre du batteur contre des parois parfois rugueuses (béton) et les bras de levier des efforts de frottement ainsi introduits sont souvent considérables. C'est pourquoi, nous avons, en général, proscrit ce type d'étanchéité, et nous nous contentons de réduire les jeux en ne leur laissant qu'une valeur suffisante pour éviter des frottements importants. Moyennant une réalisation mécanique assez précise et un troussage définitif sur place des parois du canal, on arrive ainsi à limiter les courants de fuite à une valeur raisonnable.

3° ENTRETIEN.

L'emploi généralisé du duralumin a non seulement l'avantage de réduire l'inertie des pièces mobiles, mais a également celui de rendre à peu près inaltérables les pièces en contact avec l'eau ou avec l'air. Notons cependant que nous avons employé dans certains cas des pièces fixes immergées en acier que nous avons alors protégées contre l'oxydation par un revêtement métallique convenable (shoopisation).

Les articulations sont d'autres points du mécanisme qui nécessitent un certain entretien. Nous distinguerons les articulations constamment situées hors de l'eau, qui ne posent que des problèmes mécaniques classiques, et les articulations immergées pour lesquelles des précautions particulières s'imposent.

Ces articulations sont, en effet, soumises à un régime très dur : elles sont tantôt dans l'eau, tantôt exposées à l'air au cours des nombreuses manœuvres de vidange et de remplissage du modèle; elles sont baignées par de l'eau chargée de sable lorsque les essais concernent un modèle à fond mobile; enfin, elles sont souvent soumises à des couples électrolytiques car elles peuvent se trouver au voisinage de métaux différents, le duralumin étant impropre à la construction de paliers.

Devant toutes ces difficultés, notre attitude a été la suivante :

Nous avons abandonné l'espoir de construire des paliers suffisamment robustes pour pouvoir résister indéfiniment aux efforts combinés de la corrosion et de l'usure; nous avons préféré, au contraire, réduire systématiquement le diamètre des axes immergés, ce qui a l'avantage, signalé plus haut, de rendre les frottements négligeables, même en cas de grippage. Bien entendu, les paliers tels que nous les construisons s'usent et doivent être remplacés lorsqu'ils sont trop usés. L'expérience montre d'ailleurs que de tels remplacements peuvent n'avoir lieu que tous les ans ou tous les deux ans suivant le régime de marche des appareils.

4° RÉFLEXIONS.

On sait que, pour réaliser sur des modèles des dimensions finies des conditions aux limites correspondant à celles des plans d'eau très étendus de la réalité, il est nécessaire de garnir d'amortisseurs de houle les parois du modèle. Ainsi, les ondes réfléchies par les ouvrages seront absorbées, sur le modèle, par les amortisseurs, représentant l'infini du large de la réalité. Nous ne reviendrons pas sur ces artifices qui ont fait l'objet de brevets NEYRPEC et qui sont maintenant bien connus.

Rappelons simplement que des conditions aux limites analogues doivent être réalisées devant les appareils producteurs de houle; or, nous savons que tous ceux-ci sont réfléchissants à un degré plus ou moins élevé; il se trouve d'ailleurs que ce sont en général les appareils susceptibles de donner de la houle pure qui sont les plus réfléchissants.

La nécessité d'éliminer de telles réflexions a conduit à mettre au point les filtres à houle (brevetés par NEYRPIC). Nous ne décrirons pas en détail la technique des filtres qui a fait l'objet d'un article de M. BIESEL dans *la Houille Blanche* (n° 3, mai-juin 1948).

Actuellement, tous les batteurs du Laboratoire d'Hydraulique NEYRPIC sont équipés de filtres. De nombreux modes de réalisation sont utilisés : les figures 5 et 6 en montrent deux exemples caractéristiques.

5° RÉGLAGES.

Les deux principaux réglages du mouvement du batteur concernent (dans l'état actuel de la technique) son amplitude et sa fréquence. Il est important, pour faciliter la conduite des essais, que ces réglages puissent s'effectuer avec rapidité, commodité et précision.

En ce qui concerne le réglage de la vitesse,

FIG. 5. — Filtre à houle composé de plaques perforées.

deux groupes de solutions sont utilisés actuellement au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPIC :

a) Lorsque l'on utilise un moteur asynchrone branché directement sur le réseau, la transmission comprend, outre des engrenages de réduction,

FIG. 6. — Filtre à houle en grillage.

tion convenables, un variateur continu du commerce qui permet, par le simple jeu d'un volant de réglage, de régler la fréquence à n'importe

quelle valeur choisie entre deux limites déterminées. Lorsque la gamme de variation permise par le variateur n'est pas suffisante (ce qui est

FIG. 7. — Boîte de vitesse et rhéostat pour le réglage de la vitesse de rotation de l'arbre manivelle.

FIG. 8. — Manivelle équilibrée Neyrpic.

rare), on peut intercaler un petit changement de vitesse auxiliaire.

b) Lorsque le moteur est à courant continu, on utilise, en général, une boîte de vitesses. Les valeurs intermédiaires de la vitesse sont obtenues au moyen d'un rhéostat (fig. 7).

En ce qui concerne le réglage de l'amplitude, nous nous sommes orientés, pour les appareils du type volet, vers deux solutions :

a) Si l'on ne recherche pas la possibilité d'un réglage en marche, on munit simplement la manivelle d'un maneton mobile réglable en position à l'aide d'une vis. Les glissières sur lesquelles se déplace le bloc supportant ce maneton sont graduées, ce qui permet de repérer facilement les différentes excentricités. Pour des appareils de grande dimension, le poids du maneton et de la bielle est équilibré par une masselotte qui se déplace automatiquement en sens inverse au cours du réglage de l'amplitude (fig. 8). Cette manivelle « équilibrée » a fait l'objet d'une description dans le numéro 1 de *la Houille Blanche* de janvier-février 1951.

b) Pour les réglages pouvant être effectués en marche (et même à distance) nous avons expérimenté deux procédés :

— L'un consiste à actionner la vis réglant l'excentricité par l'intermédiaire d'un engrenage commandé par un arbre concentrique à celui de la manivelle.

— L'autre consiste à avoir un levier intermédiaire de longueur réglable (genre « coulisse de

Stephenson »); ce procédé est d'ailleurs employé par d'autres laboratoires ainsi qu'on a pu le voir dans les fiches qui illustrent l'article de M. BIESEL. Nous y reviendrons plus loin.

6° PROBLÈME DE LA MOBILITÉ.

On sait qu'un appareil générateur de houle doit souvent pouvoir reproduire des houles provenant de plusieurs directions; lorsqu'il s'agit d'appareils de grandes dimensions, cela pose un problème difficile. Nous allons examiner ci-dessous quelques-unes des solutions que nous avons adoptées au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPIIC.

a) Poutre support :

Nous avons construit des appareils atteignant 10 mètres de long et de dimensions transversales relativement faibles, comportant une poutre support offrant une grande rigidité sur toute sa longueur et susceptible de porter, outre le volet, l'ensemble du mécanisme moteur.

La figure 9 représente un tel appareil construit pour les études sur modèle de la base navale de Mers-el-Kébir.

En étudiant soigneusement la réalisation du batteur et de la poutre support qui est faite entièrement en duralumin, on a pu limiter suffisamment le poids de l'ensemble pour que celui-ci puisse être déplacé par une équipe de quelques manœuvres; ainsi l'ensemble de l'appareil peut créer des houles dans toutes les directions. Un

FIG. 9. — Appareil générateur de houle monté sur une poutre support.

perfectionnement a d'ailleurs été apporté à ce système ainsi que nous allons le voir.

b) Caisson flottant :

Pour un modèle analogue (port de Marseille), nous avons été amenés à accroître encore la mobilité de l'appareil générateur de houle en réalisant la poutre support sous la forme d'un caisson étanche que l'on peut à volonté remplir d'air à l'aide de la canalisation d'air comprimé du Laboratoire; on peut ainsi le faire flotter d'un point à un autre du modèle. Cette réalisation a été décrite dans le numéro 6 de novembre-

décembre 1951 de *la Houille Blanche* auquel nous renvoyons le lecteur. Indiquons simplement que la partie supérieure du caisson située à l'arrière du volet a une forme arrondie réalisant une sorte de brise lame semi-immergé, ce qui a l'avantage de réduire dès le départ l'amplitude de la houle parasite émise vers l'arrière par l'appareil.

Cette solution s'étant montrée excellente à l'usage, elle a été transposée au volet du modèle de Mers-el-Kébir décrit ci-dessus. Pour cela, il a été garni de flotteurs constitués par des chambres à air de camion, que l'on peut gonfler à volonté.

FIG. 10. — Appareil générateur de houle composé d'éléments orientables.

c) Eléments orientables :

L'obligation de déplacer l'ensemble de l'appareil générateur de houle peut présenter parfois des inconvénients, indépendamment de la question du transport; en effet, dans ce cas, il est indispensable de réserver sur le modèle et au-delà de la partie où il est nécessaire de reproduire les fonds naturels, une plate-forme d'évolution assez grande pour que le batteur puisse s'y déplacer et prendre toutes les positions nécessaires.

Une autre formule, qui présente l'avantage de réduire l'encombrement du batteur, consiste à réaliser celui-ci en un certain nombre d'éléments parallèles qui reçoivent, par l'intermédiaire d'une ligne d'arbre commune, des mouvements sinusoïdaux de même période, mais de phases convenablement décalées. La figure 10

montre un exemple d'un tel batteur. Cette solution a malheureusement l'inconvénient, par rapport à la précédente, de nécessiter un réglage beaucoup plus délicat, puisqu'il faut orienter individuellement chacun des éléments et déterminer pour chacun d'eux les déphasages nécessaires. De plus, il est nécessaire de prévoir des guideaux à cause des décrochements existant entre les différents éléments; ces guideaux doivent être ajustés pour chaque orientation.

d) Batteur serpent :

Rappelons enfin une dernière solution qui a été expérimentée au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPI, et a donné des résultats extrêmement satisfaisants. L'appareil, qui a été décrit dans les

fiches illustrant l'article de M. BIESEL (fig. 11) est constitué par un très grand nombre d'éléments dont la largeur individuelle est assez petite par rapport à la longueur d'onde de la houle que l'on veut produire. L'orientation des houles produites est donnée uniquement par un décalage convenable de tous ces éléments, les uns par rapport aux autres. On peut ainsi, sans changer l'emplacement de l'appareil, produire des houles à front rectiligne ayant la direction de propagation voulue, et également des houles à front curviligne; de cette façon, il est possible de réduire dans certains cas l'étendue du modèle, puisqu'il n'est plus nécessaire de représenter les

fonds jusqu'aux régions où la réfraction ne fait plus sentir son influence.

Un autre avantage de cette solution est que, pour les modèles à marées, l'appareil peut être placé une fois pour toutes le long d'une limite quelconque du bassin d'études, limites que l'on fera correspondre, par exemple, à une ligne de courant assez stable dans la nature. Ainsi, le problème de la traversée du batteur par les ondes de marées ne se pose plus, quelle que soit la direction des vagues. Notons encore que cet appareil permet de produire des houles dont l'amplitude varie de façon quelconque le long de la ligne de crête.

FIG. 11. — Voilet-serpent.

L'inconvénient de cet appareil apparaît clairement : c'est son prix de revient. Chaque élément doit comporter une commande séparée et être pourvu d'organes de réglage en amplitude et en phase suffisamment perfectionnés pour que ce

réglage puisse s'effectuer très rapidement; en effet, le nombre des éléments pouvant dans certains cas être de l'ordre d'une centaine, il est essentiel que les réglages individuels soient très rapides.

III. — Autres problèmes

1° MAINTIEN D'UNE AMPLITUDE SUFFISANTE.

On sait que l'emploi de filtres à houle a pour effet de réduire l'amplitude de la houle créée. Cet inconvénient peut être une gêne dans certains essais, en général de caractère théorique, où l'on désire obtenir des ondes très cambrées.

Dans ce cas, il est nécessaire de renforcer la houle après que celle-ci ait traversé les filtres. Deux procédés, qui peuvent être utilisés séparément ou simultanément, ont été expérimentés au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPI depuis plusieurs années.

Le premier consiste à faire suivre les filtres

FIG. 12

d'un canal convergent où la houle se renforce; nous en verrons plus loin une réalisation.

Le deuxième consiste à faire suivre les filtres d'une remontée du fond du canal qui a peu d'effet sur l'amplitude de la houle (elle la diminue même dans certains cas) mais qui, raccourcissant sa longueur d'onde, augmente finalement sa cambrure.

Grâce à ces artifices, il est possible d'étudier, par exemple, des houles de cambrure voisine de leur valeur limite avec un filtrage assez énergétique; cette condition est d'ailleurs nécessaire pour approcher cette limite afin d'éviter les déformations parasites qui se produisent lorsque la cambrure augmente et font déferler localement la houle.

Nous devons toutefois noter que le premier procédé est d'application plus générale que le deuxième qui ne permet d'obtenir des renforcements appréciables que pour des houles dont le rapport de la profondeur à la longueur d'onde est suffisamment petit.

2° DIFFRACTION.

Le faisceau de houle créé par le générateur ne se propage pas sans perturbations depuis celui-ci jusqu'au modèle car la houle diffracte sur les bords du faisceau et son amplitude décroît dans

leur voisinage; elle ne se maintient que dans une partie centrale dont la largeur va en décroissant au fur et à mesure qu'on s'éloigne du batteur.

En effet, on peut, en première approximation, considérer que le batteur est assimilable à une brèche à travers laquelle diffracte la houle; dans ce cas, la théorie et l'expérience montrent que, pour une longueur de batteur suffisamment grande par rapport à la longueur d'onde, les lignes d'égale amplitude en profondeur constante sont des courbes d'allure parabolique. Il est donc nécessaire de donner au batteur une longueur sensiblement plus grande que celle des ouvrages soumis à l'action de la houle. La figure 12 représente un port dont on veut étudier l'agitation sous l'action de la houle du large; on voit combien les considérations qui précèdent sont importantes si l'on veut que la passe soit soumise à une houle d'amplitude correspondant aux conditions réelles avec une approximation suffisante. Il est clair que, si on donnait au batteur la longueur $A'B'$, A' et B' étant les points d'aboutissement des orthogonales passant par G et H , l'amplitude devant la passe serait très insuffisante. On voit également que l'on peut économiser sur la longueur du batteur et la réduire par exemple à CD à condition de placer des guideaux CE et DF épousant la forme des orthogonales. La figure 13 donne un exemple de tels guideaux. Toutefois, on ne doit les employer

FIG. 13. — Guideau à l'extrémité d'un appareil générateur de houle.

qu'avec précaution car ils peuvent introduire des perturbations, par exemple en réfléchissant les ondes déjà réfléchies par les ouvrages du port que l'on veut étudier.

Il est même parfois possible, pour l'étude de l'agitation du plan d'eau d'un port, de placer les guideaux suivant A'G et B'F en les prolongeant jusqu'à la passe d'entrée; *a fortiori*, dans ce cas, on doit procéder à un examen très approfondi des conditions de l'étude.

3° HOULE IRRÉGULIÈRE.

Nous avons vu combien il est difficile de réaliser des houles parfaitement régulières par suite des fluctuations de vitesse du moteur de l'appareil générateur. Il est également difficile, aussi paradoxal que cela paraisse, de produire des houles franchement irrégulières, si l'on veut être maître de leur irrégularité. Cependant, il est souvent nécessaire de faire des études avec des vagues d'amplitude variable pour bien des raisons; tout d'abord on représente ainsi de façon plus approchée les houles de l'océan, ce qui peut être utile pour certaines études (gifle, seiche, roulis de navire, etc.); on peut aussi, par exemple, soumettre au cours d'un seul essai, un ouvrage ou une plage à une gamme de vagues beaucoup plus étendue que celle qui résulterait d'une succession d'essais, chaque essai ne comportant qu'une houle de caractéristiques constantes.

La plupart des laboratoires se sont penchés sur ce problème depuis de nombreuses années et ont utilisé différentes solutions. Au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPI, nous avons, en particulier, utilisé les procédés suivants :

a) Lorsque la distance de l'appareil générateur aux ouvrages est suffisamment grande, on peut faire varier l'amplitude de la houle en modifiant, de façon plus ou moins périodique, sa fréquence, c'est-à-dire la vitesse de rotation de la manivelle; pour ceci on peut agir soit sur le variateur, soit sur un rhéostat dans le cas où le courant continu est utilisé. Ce procédé semble d'ailleurs avoir été utilisé auparavant aux États-Unis.

b) Un autre procédé, que nous avons employé il y a quelques années, consiste à interposer entre l'appareil producteur de houle et le modèle, un obstacle variable constitué, par exemple, par une vanne secteur. Les mouvements de cette dernière sont lents puisque leur fréquence est celle des trains de houle; il est par suite assez facile de les produire, avec un moteur de faible puissance par exemple.

c) Un troisième procédé utilisé par le Laboratoire consiste à employer une manivelle dont la longueur est commandée en marche par un moteur auxiliaire. On réalise ainsi directement une variation d'amplitude de la houle au départ du volet.

Nous avons également pensé à d'autres procédés qui n'en sont encore qu'au stade des essais; nous en parlerons au paragraphe VI.

4° VARIATION D'AMPLITUDE LE LONG DU FRONT DE VAGUE.

Il peut être nécessaire d'obtenir des houles dont l'amplitude varie le long de leur front. On sait en effet que ces variations ont un effet très important tout particulièrement dans le cas des modèles à fond mobile; ce sont elles qui produisent, par exemple, les courants mis récemment en évidence par M. IRIBARREN.

Parmi les procédés que nous avons utilisés, nous pouvons citer les suivants :

a) Lorsque le batteur est composé de plusieurs sections ou lorsque c'est un batteur-serpent, on règle séparément l'amplitude produite par chaque élément.

b) On peut également placer devant un batteur quelconque des batteries de filtres de puissance variable suivant l'amplitude de la houle que l'on veut obtenir pour chaque section.

Bien entendu, ces deux procédés peuvent s'employer en combinaison.

5° SEICHES ET BALANCEMENTS.

Par suite d'effets du second ordre, il arrive fréquemment que la création de houles dans un modèle produise des balancements d'ensemble du plan d'eau ou des seiches plus localisées. En particulier, le démarrage et l'arrêt de l'appareil producteur de houle produisent une sorte d'impulsion dont les effets peuvent se faire sentir pendant de nombreuses minutes. De même, quoique sous une forme moins aiguë, les fluctuations de vitesse dues aux variations de tension ou de fréquence du secteur peuvent provoquer des balancements nuisibles. Ces balancements eux-mêmes réagissent sur la houle par les variations de profondeur qu'ils provoquent et, en modifiant les plans de vagues, peuvent conduire à une instabilité propre qui s'entretient indéfiniment.

Le remède à ces oscillations du plan d'eau est certainement difficile à trouver; des écrans fixés au volet (fig. 14) ou même une batterie de gui-

deaux longitudinaux placés devant le batteur sont efficaces dans certains cas; mais il faut également veiller avec beaucoup de soin à la régularité du fonctionnement de l'appareil et attendre un temps suffisamment long avant de commencer les mesures, de façon à s'assurer que toutes les perturbations transitoires ont eu le temps de s'amortir.

6° RÉGIMES TRANSITOIRES.

Au moment où l'on coupe le courant du moteur, celui-ci, du fait de l'inertie des pièces en mouvement, met un temps appréciable pour s'arrêter; durant ce ralentissement, le batteur ayant un mouvement de plus en plus lent, la période des ondes est plus grande, leur vitesse de groupe

FIG. 14. — Ecrans fixés au volet et destinés à éviter les balancements transversaux.

également; les ondes ainsi produites rattrapent les précédentes, donnant naissance à une vague de forte amplitude dont l'effet sur les maquettes d'ouvrage contenues dans le canal est beaucoup plus important que celui des vagues en régime uniforme.

Lors de la mise en route du batteur, il se pro-

duit également — pour d'autres raisons — des effets mécaniques plus importants qu'en régime établi.

Nous évitons de tels inconvénients au moyen d'un filtre amovible assez serré que l'on peut descendre dans le canal soit à la mise en route, soit à l'arrêt.

IV. — Aide apportée par la théorie dans les avant-projets de batteur

Les calculs théoriques exposés par M. BIESEL dans l'article de *la Houille Blanche* cité plus haut, donnent des renseignements intéressants pour l'établissement d'un avant-projet de batteur; il faut évidemment que celui-ci soit construit conformément aux hypothèses du calcul, en particulier que les fuites ne soient pas trop importantes.

En ce qui concerne l'amplitude produite, il faut tenir compte d'un coefficient de rendement

de l'ordre de 70 % pour des batteurs de dimensions suffisamment grandes, variant légèrement en fonction du rapport de la profondeur à la longueur d'onde. Nous reproduisons sur la figure 15 un graphique donnant pour un volet à simple articulation équipant un canal de 600 mm de profondeur, les courbes expérimentales reliant l'amplitude e de la houle produite (2a) à la demi-amplitude e du mouvement du volet, et ceci pour plusieurs périodes; nous avons également

porté sur ce graphique les courbes théoriques. On voit que les courbes expérimentales sont très sensiblement des droites jusqu'à une certaine

amplitude, qui en fait diffère peu de l'amplitude limite que permet d'atteindre le batteur.

La théorie donne également, dans ces mêmes

FIG. 15

cas, un ordre de grandeur suffisamment approché des efforts auxquels est soumis le mécanisme; on est alors ramené à un simple problème de résistance des matériaux; on peut ainsi dimen-

sionner le batteur proprement dit et, connaissant le rendement des organes de transmission (engrenages, variateurs, paliers, etc.) calculer la puissance du moteur.

V. — Quelques réalisations

Pour illustrer ces principes, nous allons décrire deux installations types, aux buts bien distincts, en service depuis plus de trois ans dans notre Laboratoire.

1° CANAL D'ÉTUDE DE LA PHYSIQUE DE LA HOULE.

A la demande de la Direction du port de Marseille et de la Direction des Concessions de la

FIG. 16. — PLAN SCHÉMATIQUE DU CANAL

Chambre de Commerce de Marseille, nous avons réalisé une installation spécialement destinée à des recherches d'ordre général sur la physique de la houle. Il s'agissait de mettre en évidence avec une précision suffisante (très souvent meilleure que 1 %) la structure interne et les caractéristiques de l'hydrodynamique de la houle, afin notamment de les comparer aux théories; dans ce cas, les dispositifs classiques comprenant un canal de section rectangulaire uniforme équipé d'un batteur, de filtres et d'amortisseurs, très bien adaptés aux études courantes (de stabilité

de digues par exemple) sont insuffisants. Aussi avons-nous cherché à munir cette installation des principaux perfectionnements connus à cette époque et même à mettre au point certains appareils.

Ce canal avait fait l'objet d'une communication de M. WALLET à la Société Hydrotechnique de France en juin 1951, communication dont un bref résumé a paru dans le numéro spécial A 1952 de *la Houille Blanche*; de plus, il constitue le « Coin du Laboratoire » du présent numéro. Nous renverrons donc le lecteur à ces deux

FIG. 17. — Mécanisme de réglage et de commande du volet-balangoire installé sur le canal à houle.

FIG. 18. — Détail du mécanisme de réglage représenté sur la figure 17.

publications, nous contentant de décrire l'appareil producteur de houle.

Celui-ci est du type balançoire, dont le principe a été exposé dans les articles précédents; comme on le sait, le volet-balançoire permet d'adapter la loi du mouvement dans l'espace du batteur au type des houles produites; sur la figure 17 qui représente la partie supérieure du batteur, on voit les quatre articulations essentielles.

Cet appareil présente la particularité que les caractéristiques des houles qu'il produit sont réglables à distance à partir de la vitre d'observation du canal.

En effet, le volet est mis en mouvement par un système bielle-manivelle qu'on aperçoit dans le coin supérieur droit de la figure 17 et au milieu de la figure 18; mais entre la première bielle et l'articulation par laquelle est attachée le volet, est interposée une autre bielle dont la longueur est réglée par un moteur électrique. Il est ainsi possible de régler à distance l'amplitude des mouvements du volet et donc l'amplitude de la houle.

La vitesse de rotation du moteur étant elle-

même réglable à distance, tous les paramètres utiles, à l'exception de la loi du mouvement dans l'espace, peuvent être réglés à partir de la vitre d'observation de la houle.

FIG. 19

FIG. 20. — Vue de l'appareil générateur équipant le bassin d'essai pour houles obliques.

FIG. 21. — Construction d'une maquette d'ouvrage.

2° BASSIN D'ESSAIS POUR HOULES OBLIQUES.

Dans un ordre d'idées tout à fait différent, nous avons été amenés à construire un bassin d'essais qui est actuellement l'un des plus grands du monde. Ce bassin a une longueur de 40 m et une largeur de 14 m (fig. 19). Il est muni d'un appareil générateur susceptible de produire des houles de 6 m de longueur d'onde et de 30 cm d'amplitude, la profondeur maximum étant de 1 m.

Cet appareil (fig. 20), qui occupe toute la largeur du canal, est construit suivant les principes que nous avons exposés plus haut. Un arbre creux placé à la partie inférieure transmet le mouvement; des nervures verticales, assurent la rigidité de l'ensemble; le bordé est une tôle de duralumin. Ce batteur est mis en mouvement par un moteur à courant continu de 13 ch; il comporte un volant important représenté figure 2.

Ce bassin a été construit à l'occasion d'essais commandés par la Marine Nationale pour la base navale de Mers-el-Kébir. Son but est d'étudier les effets de houles obliques sur les côtes et les ouvrages; dans ce cas, il intervient en effet des facteurs (interaction d'ouvrages comportant par exemple la réflexion de la houle d'un ouvrage sur un autre, déferlements obliques, etc.) qui ne peuvent être reproduits dans les essais classiques en canal vitré. Nous avons ainsi étudié la stabilité de jetées attaquées par des houles obliques, l'agitation dans les passes d'entrée de ports, etc.

Tout un côté du bassin est garni d'amortisseurs destinés à absorber les ondes réfléchies par les ouvrages, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut; un autre côté du bassin situé derrière les ouvrages et faisant face au batteur, comprend une place amortisseuse dont le rôle est d'absorber les ondes diffractées.

FIG. 22. — Commande d'un volet-balancoire.

FIG. 23.

La figure 21, qui représente une jetée en voie d'achèvement, donne une idée de l'échelle qui peut être employée dans ce bassin et de l'importance des travaux de construction des modèles d'ouvrage. Une embarcation très légère permet de procéder à l'entretien et à la réparation des ouvrages, ainsi qu'au service du modèle, sans avoir à vider le bassin.

Des problèmes spéciaux, aussi bien théoriques que pratiques se sont posés pour l'exploitation de ce bassin; nous ne citerons que le problème des seiches transversales auquel nous avons fait allusion plus haut: celui-ci a été résolu au moyen d'une batterie de guidaux placée devant le batteur.

3° BASSIN POUR L'ÉTUDE DE LA PHYSIQUE DES HOULES A TROIS DIMENSIONS.

Nous avons été conduits à construire ce bassin pour l'étude de certains problèmes très particuliers tels que l'amortissement propre des houles de faible longueur d'onde, la diffraction de la houle, etc.

La longueur de ce bassin est de 25 m, sa largeur de 4 m et la profondeur de l'eau (qui est constante) peut atteindre 30 cm. Ce bassin est muni d'un appareil générateur de houle qui peut produire des houles d'une longueur d'onde comprise entre 20 cm et 100 cm pour des profondeurs d'eau allant de 10 cm à 30 cm; la houle ainsi produite est d'une pureté très satisfaisante, grâce à l'appareil générateur de houle employé et aux précautions prises.

Étant donné la nature des études que nous comptons effectuer, il était indispensable que le fond n'exerce aucune influence sur la propaga-

tion de la houle ou sur son amplitude, en d'autres termes qu'il ne produise aucune réfraction sur la houle. Ceci exigeait que le fond soit parfaitement horizontal; nous y sommes arrivés en mettant au point un procédé de troussage spécial. L'horizontalité a été par ailleurs contrôlée par nivellement des 133 nœuds d'un quadrillage tracé sur la dalle; l'erreur maximum relevée était de l'ordre du millimètre.

Le batteur, qui occupe toute la largeur du canal, est du type balançoire; il peut, comme nous le savons, recevoir un mouvement sur le fond. Ainsi qu'on le voit sur la figure 22, le batteur est attaqué par une bielle à un des points d'articulation du trois barres, suivant un dispositif schématisé par la figure 23. Il est mis en mouvement par un moteur de 2 ch donnant une vitesse de 1.245 trs/mn. Ce moteur est suivi d'un variateur et d'un réducteur (fig. 24) qui permet de produire les fréquences de houle désirées.

FIG. 24

A l'extrémité opposée au batteur était disposée une plage absorbante de pente faible. Pour permettre d'étudier l'évolution propre et l'amortissement des houles progressives, il fallait en effet supprimer toute réflexion, afin de rendre les expériences comparables les unes aux autres.

Cette plage fut d'abord construite en sable, mais on éprouva des difficultés à la rendre stable; le matériau était en effet entraîné au large d'une manière désordonnée, modifiant ainsi les caractéristiques hydrauliques de l'installation. Il était par ailleurs difficile d'obtenir un sable rigoureusement propre; or, des impuretés pouvaient modifier la tension superficielle et la viscosité de l'eau servant aux expériences. Comme il n'était pas exclu *a priori* que ces deux grandeurs n'aient pas une influence sur l'amortissement propre des houles de faible longueur d'onde, il était indispensable que la viscosité et la tension superficielle de l'eau soient rigoureusement constantes. Il fallait donc constituer la

plage avec un matériau que l'on puisse facilement débarrasser de toutes ses impuretés et qui, en raison du poids de ses éléments, ne soit pas entraîné vers le large; notre choix s'arrêta sur des graviers concassés, puis roulés dans une bétonneuse, par conséquent ne présentant plus d'arêtes vives ou de surface plane continue; leur diamètre moyen était égal à 1 cm.

Comme dans toutes nos installations, un amortisseur analogue que l'on peut voir sur la figure 22 était disposé immédiatement à l'arrière du batteur, entre celui-ci et le mur d'extrémité du bassin; cet amortisseur avait toutefois un talus beaucoup plus raide que celui qui constituait la plage amortisseuse faisant face au batteur.

Le bassin était, d'autre part, muni de filtres constitués par des gabions en grillage métallique, de type précédemment décrit.

Derrière la plage d'amortissement était disposé un seuil déversant occupant une fraction de la largeur totale du bassin. Ce déversoir était utilisé pour évacuer la couche superficielle (polluée par la poussière, les traces d'huile de graissage, etc.) avant chaque essai; pour cela, le bassin était alimenté à faible débit à l'extrémité opposée, c'est-à-dire au voisinage du batteur à houle, et on laissait l'eau se déverser à l'autre extrémité pendant un temps suffisant.

Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que nous avons alimenté constamment ce bassin avec l'eau d'usage public de la ville de Grenoble, eau filtrée dont la température est pratiquement constante, et dont nous avons vérifié la constance de la tension superficielle.

4° RÉSULTATS OBTENUS.

La recherche systématique des améliorations dans la production de la houle nous a permis de mettre au point des techniques d'étude de plus en plus précises et d'obtenir, par suite, des résultats que nous pensons intéressants.

Nous ne traiterons pas ce sujet, puisque c'est une grande partie de l'activité de notre section d'études maritimes qu'il faudrait relater.

Nous renverrons au « Coin du Laboratoire » cité plus haut, où sont relatés quelques résultats d'expériences effectuées sur le canal d'étude de la physique de la houle.

Nous citerons également l'étude de l'amortissement des houles de faible longueur d'onde, de l'effet d'échelle sur la diffraction de la houle, etc. Ces études ont fait l'objet d'une thèse d'ingénieur-docteur soutenue par le colonel Dixon (du Corps of Engineers U.S.A.) devant la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble en 1949. Nous citerons également l'étude de l'agitation

dans un port carré et dans un port circulaire à parois entièrement réfléchissantes.

Cette dernière étude a fait l'objet d'une thèse de doctorat ès sciences soutenue devant la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble par le professeur Mc NOWN, de l'Université d'Iowa. Moyennant certaines hypothèses, M. Mc NOWN a mis en équations le problème du port circulaire et du port carré. Il a pu ainsi montrer théoriquement que lorsque la fréquence de la houle à l'extérieur du port passait d'une valeur à une autre très voisine, la configuration de l'agitation à l'intérieur du plan d'eau pouvait varier considérablement. L'expérience a entière-

FIG. 25. — Agitation dans un port circulaire pour une valeur donnée de la période de la houle excitatrice.

FIG. 26. — Agitation dans un port carré pour une valeur donnée de la période de la houle excitatrice.

ment confirmé ces prévisions théoriques, tant au point de vue de la configuration de l'agitation du plan d'eau que du point de vue de la variation de cette configuration avec un léger changement dans la fréquence de la houle. Les figures 25, 26 et 27 donnent quelques comparaisons de l'expérience et les théories, ainsi qu'une photographie de l'agitation à l'intérieur du port.

VI. — Tendances actuelles et vues d'avenir

1° LOI DU MOUVEMENT DANS LE TEMPS.

Nous nous sommes volontairement limités dans la première partie à l'étude de la réalisation du mouvement sinusoïdal. En fait, des recherches expérimentales et théoriques nous avaient, depuis longtemps, laissé entrevoir que l'amélioration de la qualité des houles produites, surtout dans le domaine des fortes amplitudes et des grandes longueurs relatives (1) devait être

(1) Nous appelons ainsi le rapport de la longueur d'onde à la profondeur.

recherchée dans le perfectionnement de la loi du mouvement dans le temps.

Un premier pas dans ce domaine a consisté à réaliser ce que nous avons appelé la « double commande ». Celle-ci consiste à donner au volet un mouvement résultant de la superposition de deux mouvements sinusoïdaux, l'un étant de fréquence fondamentale (fréquence de la houle) et l'autre de fréquence double (terme du second ordre). Au moyen d'un dispositif mécanique schématisé par la figure 28, en faisant varier les amplitudes et les phases relatives à ces deux composantes, nous avons pu effectivement faire

Fig. 27. — Un cas d'agitation dans un port circulaire.

varier la qualité de la houle et arriver à supprimer complètement le phénomène de la « double crête » dû à un harmonique de période moitié, déjà signalé dans l'article de M. BIESEL, paru dans le numéro 3 de *la Houille Blanche* 1948; cette double crête apparaît même lorsqu'on utilise un filtre si la longueur relative de la houle est grande.

La réalisation pratique de ce batteur ayant été assez peu satisfaisante, nous ne l'avons pas uti-

lisé pour des essais courants et nous nous sommes orientés vers d'autres directions.

L'une de celles-ci qui, pour l'instant, n'est restée qu'à l'état de projet, consiste à utiliser un réglage instantané de la vitesse du moteur actionnant le batteur. Grâce à une telle modification de régime intervenant au cours d'une période, on pouvait espérer donner au mouvement de la bielle une loi différant légèrement de la loi sinusoïdale.

L'avantage de ce procédé serait de combiner en un seul dispositif électronique, le contrôle des fréquences moyennes et la réalisation d'une loi de mouvement convenable.

Enfin, un procédé que nous avons mis au point il y a quelques années, consiste à utiliser un servo-moteur à huile commandé par une came taillée suivant un profil convenable. Les efforts sur la came étant très faibles, celle-ci peut être réalisée en matériau léger, plexiglas par exemple, et peut être mise en mouvement par un moteur de faible puissance. Une formule intéressante consiste par exemple à l'actionner à l'aide d'un transmetteur du type Selsyn qui

Fig. 28.

assure ainsi, pour un ensemble d'éléments travaillant en conjugaison, un synchronisme aussi parfait que possible. Cet appareil permet évidemment de réaliser n'importe quelle loi de mouvement dans le temps.

2° HOULE IRRÉGULIÈRE.

L'appareil que nous venons de décrire sert également à réaliser des houles d'amplitude variable. Il suffit pour cela de lui donner à suivre

une came comportant des indentations d'amplitude variable. Cette solution extrêmement souple peut être employée pour de nombreux essais.

Un procédé que nous avons également envisagé, mais qui n'existe actuellement qu'à l'état de projet, consiste à utiliser un régleur électronique, non seulement pour maintenir constante la fréquence et assurer une loi de mouvement convenable, mais aussi pour réaliser des fluctuations de vitesse; il est ainsi possible de produire des amplitudes variables par le procédé déjà signalé de modulation de fréquence.

Conclusion

L'exposé qui précède, faisant suite aux articles cités plus haut, a eu pour but de montrer la complexité des problèmes que pose la réalisation des houles sur modèle réduit.

Grâce à des recherches continues, étayées à la fois par l'expérience quotidienne et par des études théoriques, nous pensons avoir réussi à perfectionner la technique des essais de houle et à augmenter par suite la sécurité de leur inter-

prétation. Ce travail de perfectionnement se poursuit tous les jours.

Nous nous sommes bornés ici à la génération de la houle, mais le reste de l'appareillage pose d'autres problèmes aussi importants et aussi complexes; certains d'entre eux ont déjà été abordés dans les pages de cette Revue; nous souhaitons que d'autres le soient bientôt.

NOTE DES AUTEURS

Depuis la rédaction de cet article (mai 1952), le Laboratoire d'Hydraulique Neyrpic a mis en service un batteur-serpent de 25 m de largeur, composé de 63 éléments; ce batteur peut produire une houle satisfaisante, même lorsque l'angle des crêtes avec la ligne des batteurs élémentaires est très grand; il peut également produire des houles dont la forme des crêtes en plan est courbe. Chaque élément possède un dispositif permettant le réglage rapide de l'amplitude et de la phase.