LE COIN DU LABORATOIRE

Appareils pour la mesure des niveaux rapidement variables sur modèle réduit *

English text, p. 541.

Distinction entre les méthodes « synthétiques » ou « globales » et les méthodes « analytiques » ; l'intérêt et les limites des premières. — Les divers procédés appliquant les méthodes analytiques : pointe de mesure, électrique ou non, manœuvrée à la main ; flotteurs ; systèmes optiques ; systèmes électromécaniques. — Les avantages (souplesse, absence d'inertie) et les inconvénients (tension superficielle, température, salinité, turbidité...) des procédés purement électriques. — L'expérience acquise au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique dans ce domaine : les appareils à résistance, leur abandon au profit des appareils à capacité. Les divers types d'appareil à capacité réalisés, les succès de leur exploitation.

Distinction between "synthetic" or "aggregate" methods and "analytical" methods; the value and limitations of the former. Various processes applying analytical methods: measurement point, electrical or not, operated by hand; floats; optical systems; electromechanical systems. The advantages (flexibility, absence of inertia) and inconveniences (superficial current, temperature, salinity, turbidity) of purely electrical processes. The experience gained in this field at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique: resistance appliances; rejection of these in favour of capacity appliances. The various types of capacity appliances produced, their success and their development.

La technique du modèle réduit s'approfondissant chaque jour davantage, le technicien n'entend pas borner sa connaissance à la seule valeur moyenne des phénomènes. L'étude et la mesure dynamique des phénomènes prennent donc une importance de plus en plus grande. Parmi les grandeurs rapidement variables ren-

contrées en hydraulique, les niveaux fluctuants présentent une grande importance technique.

En première analyse, nous pouvons classer en trois groupes les niveaux rapidement variables :

Les phénomènes périodiques : houle, ondes stationnaires, etc. ;

Les phénomènes permanents en moyenne et cependant fluctuants : ressauts, etc. ;

Les phénomènes transitoires : ondes, mascarets, etc.

* Communication de M. BOUDAN au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France, session du 25 au 27 novembre 1952.

FIG. 1

Installation de capteurs dans une partie d'un modèle maritime.
Detectors installed in part of a marine model.

Cette classification présente un intérêt pour le technicien de la mesure car les mêmes méthodes ne s'appliquent pas à chacun de ces groupes.

Nous allons examiner succinctement les méthodes de mesure des niveaux rapidement variables et décrire sommairement quelques appareillages conçus dans ce domaine. Enfin, nous présenterons un nouvel appareillage mis au point et utilisé actuellement au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

MÉTHODES DE MESURE.

Nous distinguerons :

- D'une part, les méthodes « synthétiques » ou « globales » s'appliquant à l'ensemble du phénomène en différents points de l'espace;
- D'autre part, les mesures que nous appellerons par opposition « analytiques », s'appliquant à l'étude locale du phénomène en fonction du temps.

a) MÉTHODES SYNTHÉTIQUES.

Ces méthodes ne sont pas, en général, des méthodes de précision, mais elles sont parfois les seules applicables, notamment dans l'étude des phénomènes transitoires sur les modèles à trois dimensions. En effet, dans la plupart des cas, le phénomène ne peut pas être répété, rigoureusement identique à lui-même; il faut donc pouvoir mesurer l'évolution des agitations en tous les points caractéristiques pendant la durée de l'essai.

Nous citerons parmi les appareillages permettant de réaliser ces mesures :

- la stéréophotographie ;
- le ciel étoilé ;
- l'ondoscope Neyrpic.

La stéréophotographie a l'inconvénient d'exiger des dépouillements longs et délicats. Cette

méthode, employée par ailleurs pour la mesure de l'amplitude de la houle en mer à proximité des côtes, a fait l'objet d'applications à la mesure des ondes de translation dans les canaux découverts (Etude théorique et expérimentale de M. Henry Favre, 1935).

La méthode du ciel étoilé, due à M. le Président BARILLON a été employée avec succès, notamment au Laboratoire de Chatou.

Le dernier procédé, l'ondoscope Neyrpic, est employé dans nos laboratoires, notamment pour l'étude des ondes en canaux ou dans les modèles maritimes. Dans sa réalisation pratique, le niveau du modèle est détecté en 40 points par des capteurs à capacité (décrits plus loin). Ces 40 points sont envoyés simultanément sur l'écran d'un oscillographe photographié par une caméra à 8 images par seconde, et l'on obtient une sorte de profil du modèle. La figure 1 montre l'installation des capteurs dans une partie d'un modèle maritime. La figure 2 montre une phase de la propagation d'une onde en canal.

FIG. 2. — Ondoscope. — Propagation d'une onde en canal.
Ondoscope. — Wave propagation in a canal.

b) MÉTHODES ANALYTIQUES.

Ces méthodes sont d'une application beaucoup plus générale que les précédentes. Leur précision est souvent suffisante pour appuyer des recherches physiques sur l'évolution des niveaux. On observe localement la variation du niveau en un point, en fonction du temps. Si le phénomène est périodique, on pourra multiplier les points de mesure et étudier l'agitation en tous les points du modèle. La mesure simultanée en tous les points caractéristiques n'est alors plus nécessaire. Ces méthodes analytiques s'appliquent au cas particulier très important de l'étude des agitations dans les modèles de port.

Nous allons décrire sommairement quelques appareillages adaptés à ce type de mesure.

APPAREILLAGES DE MESURE ANALYTIQUE.

Les différents procédés de mesure donnent soit la valeur de l'amplitude, soit l'enregistrement

FIG. 3. — Pointe de mesure équipée d'un contrôle électrique à voyant néon.
Gauging point fitted with neon eye electrical control.

FIG. 4. — Enregistreur de houle à flotteurs.
Float wave-recorder.

de la variation locale du niveau en fonction du temps. La plupart de ces procédés peuvent se ranger dans la classification suivante :

1. *Procédé manuel :*

Ce procédé permet le relevé de l'amplitude maximum de la variation du plan d'eau au point de mesure. On opère avec une pointe palpeuse soit directe, soit inversée. Le palpeur est souvent muni d'un indicateur optique à œil cathodique ou d'un voyant néon placé dans la plaque d'un tube à vide, montage permettant d'obtenir une plus grande sensibilité.

La nécessité de saisir la mesure au vol et les phénomènes capillaires limitent la précision. Cependant, dans le cas d'une houle régulière d'assez forte amplitude, la précision relative est bonne. Si le pointage est effectué par un expérimentateur averti, l'erreur absolue probable à la crête et au creux est de l'ordre de $4/10^{\circ}$ de mm. On connaîtra donc l'amplitude à mieux que 1 mm près. Pour une amplitude de 10 cm, l'erreur relative sera inférieure au pour cent. A cette erreur près, la valeur de l'amplitude d'une houle régulière donnée par ce procédé est indiscutable. La mesure à la pointe palpeuse électrique servira donc de contrôle pour les autres appareillages. La figure 3^e montre une pointe de mesure équipée d'un contrôle électrique à voyant néon.

2. *Procédé mécanique :*

Ce procédé est historiquement le premier procédé d'enregistrement de la houle sur modèle réduit. Un flotteur léger actionne un bras de faible inertie monté sur pivot, et un style enregistre en coordonnées polaires les mouvements du flotteur sur une plaque fumée (fig. 4). Ce procédé a l'avantage de la rusticité et du bon marché mais sa mise en place est en général assez délicate. Ce procédé de mesure a fait l'objet d'une étude approfondie dans la thèse de M. RANSFORD, du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, présentée à la Faculté des Sciences de Grenoble (1950). Pour des houles régulières, l'erreur reste assez faible jusqu'à des périodes de l'ordre de 0,8 sec. Pour des périodes plus petites, le flotteur déjaugé en général et indique une amplitude exagérée. Si la houle est irrégulière, le flotteur devient rapidement incapable de suivre les harmoniques.

3. *Procédé optique :*

On a essayé d'enregistrer les variations du niveau en projetant sur une plaque sensible l'image d'une source lumineuse réfléchi sur la surface de l'eau. Cette méthode est basée sur le même principe que celle du ciel étoilé. Dans le cas du ciel étoilé, elle était d'un intérêt certain par la possibilité d'obtenir une mesure glo-

bale de l'agitation en tous les points du modèle. Cependant, il est assez difficile de relier les déplacements du point lumineux aux amplitudes et l'état des surfaces rend bien souvent la précision illusoire.

On peut perfectionner l'enregistreur mécanique à flotteur en remplaçant le style enregistreur par un petit miroir réfléchissant un rayon lumineux sur un papier sensible. Cette solution diminue les frottements et permet d'alléger l'en-

FIG. 5. — Mesure de l'amplitude de la houle résiduelle.
Mise en place d'une batterie d'enregistreurs à flotteurs.
*Amplitude measurement of the residual wave.
Installation of float wave recorder battery.*

FIG. 6. — Mesure de l'amplitude de la houle résiduelle.
Enregistrement de nuit sur papier sensible.
Night recording on sensitive paper.

FIG. 7. — Limnigraphe à pointe vibrante.
Licence LNH Chatou - fabrication Neyrpic
Vibrating point limnigraph.
Chatou LNH licence - Neyrpic manufacture.

semble ; cependant, la difficulté d'exploitation n'est pas compensée par le gain en précision et en sensibilité. Un tel appareillage a été cependant exploité un certain temps au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. Les figures 5 et 6 montrent la mise en place et le fonctionnement d'une batterie d'enregistreurs de ce type.

4. Procédé électro-mécanique :

Pour ne plus demander à un organe mécanique l'énergie nécessaire à l'enregistrement, on asservit, à l'aide d'un moteur de commande, la position de la plume enregistreuse à la position d'une pointe électrique détectant le plan d'eau. On peut citer parmi les enregistreurs de ce type la réalisation de M. VALEMOIS, du Laboratoire National de Chatou, le limnigraphe à tête vibrante, construit actuellement par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (fig. 7). Cet appareil est d'une bonne fidélité et d'une souplesse d'emploi satisfaisante, ce qui permet de suivre des houles régulières ayant pour période environ 1,5 sec. Des raisons technologiques, principalement l'inertie du moteur d'asservissement, ne permettent pas de mesurer des phénomènes de période plus courte sans introduire de terme correctif sur l'amplitude.

La tête vibrante employée seule permet, par contre, la mesure de phénomènes très rapides pour des amplitudes inférieures à 2 mm. Ce procédé a fait l'objet d'une communication de M. VALEMOIS au Comité Technique de la S.H.F. au mois de mai 1952.

5. Procédé électrique :

L'appareil que nous présentons étant basé sur un procédé électrique de détection des variations

du niveau, nous allons discuter particulièrement ce procédé.

PROCÉDÉS ÉLECTRIQUES DE MESURE DE NIVEAU.

Ces procédés se sont développés depuis quelques années dans la plupart des laboratoires d'hydraulique. Ils nécessitent un appareillage assez complexe et on peut leur reprocher l'influence de la tension superficielle et des paramètres physiques de l'eau : température, salinité, turbidité, etc. Cependant, leur absence d'inertie et leur souplesse d'utilisation les font en général préférer aux autres modes de mesure.

Les appareillages électriques de mesure de niveau sont d'abord caractérisés par le type du capteur transformant la variation de niveau en une grandeur électrique : les capteurs sont de type discontinu ou de type continu.

Les capteurs discontinus sont constitués par une série de plots également répartis sur une verticale. Entre ces plots sont connectées en série des résistances. L'eau shunte les résistances correspondant aux plots immergés et la résistance totale varie en fonction de l'enfoncement du capteur. Ce capteur, séduisant en principe, présente de nombreux inconvénients. Si les résistances ont une valeur faible, l'eau ne pourra plus être considérée comme une masse parfaite et la mesure variera avec la résistivité de l'eau ; de plus, la mesure ne sera plus linéaire. Si, au contraire, les résistances ont une valeur forte, le ménisque interviendra d'une manière considérable ; l'espacement des plots ne permet pas une mesure précise des petites amplitudes ; enfin, le capteur est très encombrant et peut perturber le phénomène à mesurer.

Les capteurs continus semblent donc préférables. De plus, leur réalisation est en général assez simple, leur prix de revient est bas et on pourra multiplier les capteurs aux points de mesure. Nous citerons 2 types de capteurs continus ayant fait l'objet d'applications pratiques importantes : les capteurs à résistance et les capteurs à capacité.

1. Capteurs à résistance :

Ce type de capteur a été employé plusieurs années au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. Les premiers capteurs étaient constitués d'abord par deux plaques, puis par deux tiges métalliques d'environ 1 mm. de diamètre et espacées de quelques millimètres. On mesurait la variation de résistance électrolytique du milieu liquide entre les deux électrodes en fonction de l'enfoncement du capteur. Les capteurs ont été constitués ensuite par une tige unique servant d'électrode de mesure (figure 8), le circuit électrique se refer-

FIG. 8. — Capteur à résistance,
à électrode unique.

*Single electrode
resistance detector.*

FIG. 9. — Poste central
d'enregistrement des agitations
mesurées par capteur
à résistance.

*Central recording station
for disturbances measured
by resistance detector.*

Origine :

A

E

F

G

FIG. 10. — Enregistrement de houle procédé par capteurs à résistances, alimentés en 50 périodes, et enregistreur oscillographique.

Direction : N, NE $2L = 140$ m

Wave recording process by resistance detectors, 50 cycle supply, and oscillograph recorder.

Direction : N.NE - $2L = 140$ m

mant par des masses disposées dans le modèle. Ces capteurs sont très robustes, ils peuvent être alimentés en courant industriel 50 périodes ; l'appareillage de mesure comprenait donc un transformateur d'isolement abaissant la tension du secteur à une tension compatible avec le fonctionnement des capteurs, le secondaire de ce transformateur alimentait un pont de Wheatstone dans une des branches duquel était inséré le capteur de mesure. Dans la diagonale de mesure du pont, on plaçait l'entrée d'un oscillographe cathodique. La longueur du spot variait avec l'enfoncement du capteur. On enregistrait, après tarage, ses variations sur un film de papier sensible déroulé continuellement devant l'écran de l'oscillographe par une caméra. La figure 9 représente le poste central d'enregistrement avec deux blocs enregistreurs ; la figure 10, des enregistrements de houle réalisés par ce procédé.

Cet appareillage présente de nombreux inconvénients, d'abord d'ordre pratique : l'enregistrement sur papier sensible interdit à l'opérateur d'assister à l'enregistrement, d'où de nombreux défauts de cadrage ou de sensibilité ; ensuite d'ordre technique : l'enregistrement ne suit pas linéairement l'enfoncement du capteur. Mais les défauts les plus graves résident dans la physique du capteur lui-même.

L'impédance, grandeur électrique mesurée, n'est pas localisée sur la « peau » du capteur, mais dans le milieu liquide environnant. Le champ à potentiel, vu en plan, est semblable au champ d'un doublet, dans le cas du capteur à

deux tiges, et au champ d'une source en milieu infini à deux dimensions, dans le cas du capteur à une tige. L'impédance du capteur dépend donc des conditions géométriques au voisinage du point de mesure. L'étalonnage changera avec la profondeur d'eau, l'approche des quais, l'éloignement de la masse et même la cambrure de la surface libre. Par contre, l'influence du ménisque restera faible. D'autre part, les mesures effectuées avec ce capteur présentent l'inconvénient des mesures en milieu électrolytique. Même si les variations de résistivité du milieu restent négligeables, on devra, pour obtenir une bonne stabilité électrique, choisir d'abord le métal des électrodes, ensuite opérer avec une fréquence assez élevée pour diminuer les effets de polarisation, enfin ne pas dépasser un certain gradient de tension au voisinage de l'électrode. Ces conditions compliquent l'appareillage en nécessitant l'emploi d'une part, du côté alimentation, d'un générateur basse fréquence, d'autre part, du côté mesure, d'un amplificateur de gain élevé, étant donnée la faible tension délivrée par le capteur.

La plupart de ces erreurs sont éliminées par l'emploi du capteur à capacité.

2. Capteurs à capacité :

Le principe de ce capteur n'est pas très récent, il est cité dans le Cours de M. VADOR à l'Ecole des Ingénieurs Hydrauliciens de Grenoble. Cependant, l'emploi de ces capteurs ne s'est pas développé jusqu'à présent pour des raisons technologiques : difficulté de réalisation d'un fil

FIG. 11. — Capteurs à capacité.
Capacity detectors.

isolant assez mince et assez homogène. L'actuelle fabrication des fils émaillés à haute résistance pour le bobinage permet de résoudre ce problème d'une manière en tous points satisfaisante. Les capteurs à capacité employés par le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique sont donc constitués par du fil émaillé à haute résistance mécanique tendu sur une lyre métallique servant de support ; ce mode de réalisation est présenté sur la figure 11. La figure 12 montre l'installation d'un capteur à capacité à poste fixe dans un canal d'études d'ondes.

La capacité de mesure est une capacité cylin-

FIG. 12. — Installation, à poste fixe, d'un capteur à capacité dans un canal d'études d'ondes.
Stationary installation of capacity detector in a wave study canal.

drique dont l'armature interne est le cuivre de la pointe, le diélectrique l'émail, et l'armature externe l'eau. Si le diamètre du fil et l'épaisseur du diélectrique sont constants, la capacité, donc l'admittance de la pointe, varie linéairement avec l'enfoncement.

L'expérience montre qu'il est facile de trouver du fil industriel dont l'épaisseur d'émail est constante avec une bonne précision sur les faibles longueurs exigées par les capteurs. Le principal avantage de ces capteurs est d'éliminer la résistance électrolytique et les effets de polarisation toujours très difficiles à éviter. On pourra donc attaquer le capteur avec un signal de niveau élevé, ce qui simplifiera l'appareillage et augmentera la sécurité d'exploitation. On pourra même mesurer sans amplification le signal de mesure délivré par le capteur, indépendamment de l'appareillage enregistreur.

L'admittance de mesure étant concentrée sur la « peau » de la pointe, l'eau étant une masse pratiquement parfaite devant l'impédance du capteur, et, de plus, la résistance de la masse étant en quadrature de phase, toutes les erreurs dites géométriques, fond, parois, forme de la surface, se trouvent éliminées.

Par contre, l'erreur de ménisque est un peu plus importante que pour les pointes à résistance. Cette erreur se trouve diminuée par le fait que l'eau ne mouille pas l'émail mais elle reste très sensible pour les pointes de gros diamètre, les premières employées. On l'élimine, en pratique, avec du fil de quelques dixièmes de mm pour les houles de forte amplitude, qui exigent du fil résistant, et avec du fil de quelques centièmes de mm pour une petite houle de modèle. L'erreur de ménisque devient ainsi pratiquement indiscernable et est inférieure à quelques dixièmes de mm.

On peut abaisser l'impédance de la pointe en augmentant la fréquence d'attaque, mais interviennent alors les pertes et les fuites de ligne, négligeables pour les pointes à résistance.

La solution pratique est dans un compromis: on augmente le nombre de fils du capteur pour rendre les pertes et les variations accidentelles de la ligne (contacts de la main, passages immergés) négligeables, mais on garde une impédance assez élevée pour rendre l'influence de masse négligeable.

Les capteurs actuels ont une impédance de l'ordre de 2 à 5.000 ohms, à la fréquence de 15 kilocycles.

Après de longues recherches, nous avons donc abandonné les capteurs à résistance et nous avons réalisé quelques appareillages de type semi-industriel basés sur l'emploi du capteur à capacité.

FIG. 13. — Chariot automoteur et capteur à capacité.
Self-propelled trolley and capacity detector.

*Appareillages construits par le Laboratoire
Dauphinois d'Hydraulique, basés sur l'emploi
des capteurs à capacité.*

Le capteur apparaît électriquement comme une capacité variant linéairement avec l'enfoncement. Cette capacité possède un fort angle de pertes, dû, d'une part, aux pertes propres de l'émail, d'autre part à la résistance de l'eau en série. Cet angle de pertes ne permet pas d'appliquer les procédés classiques de mesure de capacité en haute fréquence par accord d'un circuit oscillant. Par ailleurs, pour des commodités de manipulation sur modèle, c'est-à-dire en milieu humide, nous avons préféré rester dans le domaine de la basse fréquence et choisir comme fréquence d'attaque 15.000 cycles par seconde. La mesure se ramène à la mesure d'une admittance variant linéairement avec le phénomène physique à détecter.

On peut remarquer que, si la tension aux bornes du capteur reste fixe, le courant con-

sommé par le capteur variera linéairement avec l'admittance, c'est-à-dire avec le phénomène. Cependant, la puissance dont on dispose aux bornes du capteur est trop faible pour que l'on puisse songer à actionner directement un enregistreur à plumes.

Nous avons préféré, en effet, le système à plume encreuse aux autres modes d'enregistrement car il facilite grandement l'exploitation. Le contrôle permanent de l'enregistrement est, en effet, un facteur pratique de grande importance dans le rendement des essais. De plus, l'industrie française produit actuellement des enregistreurs à encre à réponse rapide étudiés pour les besoins de la Radiodiffusion.

Nous placerons donc un amplificateur entre le capteur et l'enregistreur. Le problème technique est de fournir à l'amplificateur une tension variant linéairement avec l'admittance du capteur et présentant un niveau aussi élevé que possible pour demander à l'amplificateur un faible gain, ce qui lui assurera une bonne linéarité et une bonne fidélité.

Nous avons déjà décrit dans une conférence présentée par M. SAUVAGE DE SAINT-MARC à la S.H.F., au mois de novembre 1950, au sujet du halomètre, un montage linéaire en admittance ;

FIG. 14. — Installation de la ligne d'alimentation d'un capteur sur chariot automoteur à grand déplacement.
Feed-line installation for trolley-carried detector.

on branche en série avec l'admittance à mesurer une impédance en quadrature de phase avec elle. Dans l'exemple du capteur à capacité, cette impédance sera une résistance. Si cette impédance a un module égal au $1/15^{\circ}$ du module minimum de l'impédance variable, on démontre que la tension aux bornes de l'impédance fixe varie linéairement avec l'admittance du capteur. L'erreur commise est inférieure à 0,25 %. Nous avons perfectionné ce montage en introduisant une contre-réaction de phase variable à l'une des bornes du capteur, l'autre borne étant à la masse. Cette contre-réaction stabilise la tension aux bornes du capteur et permet d'obtenir une tension d'un niveau très élevé variant linéairement avec l'admittance du capteur. En pratique, la tension de mesure varie linéairement de 0 à environ 20 V quand le capteur passe de l'émersion à l'immersion maximum.

Sur ce principe, nous avons réalisé trois types d'appareils répondant aux différents besoins des utilisateurs :

- Le premier de ces appareils, l'enregistreur d'onde, est adapté spécialement à l'étude des ondes et des houles en canal.
- Le second, l'enregistreur graphique de houle (EGH), peut assumer les fonctions du premier, mais il est d'un emploi beaucoup plus souple et se prête à l'exploitation quasi industrielle des modèles à houle.
- Le troisième, l'indicateur d'amplitude, très facilement maniable, mais de précision inférieure à celle des deux précédents, est destiné aux études préliminaires sur les

FIG. 15. — Ensemble des blocs interchangeables : « oscillateur, bloc puissance, ampli alternatif, bloc canal ampli continu et filtre seiche, filtre de centrage ».

Block of interchangeable units : oscillator, power park, alternating amplifier canal unit direct amplifier and "seiche" filter, centering filter.

FIG. 16. — Bloc n° 5 : « ampli continu et filtre seiche », vue capot ôté.

Unit n° 5 : direct amplifier and "seiche" filter. View with cover removed.

modèles à houle. Il n'est pas enregistreur mais donne la valeur de l'agitation maximum aux points de mesure.

Pour ces trois appareils, le poste de mesure se trouve toujours placé sur le bord du modèle. Le capteur peut être déplacé d'un point du modèle à l'autre; par exemple, sur les modèles à houle du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, ces capteurs sont généralement disposés sur des petits chariots auto-moteurs montés sur rails et balayant les zones caractéristiques (figure 13). La figure 14 montre une installation de la ligne d'alimentation d'un capteur sur chariot. Souvent, on utilise même successivement plusieurs capteurs au cours d'un seul essai, les écarts de tarage d'un capteur à l'autre étant la plupart du temps inférieurs au pour cent. La distance entre les capteurs et le poste de mesure peut varier entre quelques mètres et environ une centaine de mètres.

Dans la réalisation pratique de l'appareillage nous avons mis un système nouveau de blocs interchangeables semblable à celui réalisé actuellement dans les machines électriques. L'appareil est, en effet, composé de petits blocs constituant chacun une unité électronique : oscillateur, bloc de puissance, amplificateur, bloc d'attaque de l'enregistreur, par exemple. Ces blocs sont raccordés au châssis général par des connecteurs et leur pose se fait instantanément. Un technicien non spécialiste peut ainsi procéder au dépannage de l'appareil; un détail technologique de cet ordre est d'une grande importance pour la bonne réussite des essais et leur continuité. Les figures 15 et 16

FIG. 17. — Enregistreur d'ondes.
Wave recorder.

présentent quelques aspects de cette réalisation.

Nous allons décrire sommairement les trois appareils cités ci-dessus et leurs caractéristiques.

1. L'enregistreur d'onde (fig. 17):

L'appareil comprend deux malles, munies de poignée de transport, et un jeu de sondes. La première mallette contient l'appareillage électronique, la seconde l'enregistreur.

Après avoir choisi le capteur correspondant au type de l'essai, l'opérateur tare l'appareil en donnant au capteur des enfoncements statiques connus. Grâce à un bouton de tare, il fait correspondre un nombre entier de centimètres ou de millimètres à chaque graduation linéaire de l'enregistreur, ce qui facilite beaucoup le dépouillement des essais.

FIG. 19. — Enregistreur graphique de houle en modèle.
Graphic model-wave recorder

La gamme des amplitudes mesurables est comprise entre 50 cm et 1/2 mm. La précision atteint souvent 1 % pour des périodes supérieures à 0,6 s. Si le phénomène est trop rapide pour être enregistré graphiquement, on emploiera un tiroir oscillographe indépendant de l'appareil, possédant un balayage déclenché manuellement de durée variant entre 18 sec. et 1/100^e de sec. et permettant la photographie du phénomène en pose sur plaque photographique.

La figure 18 représente un enregistrement d'ondes en canal obtenu par cet appareil.

2. L'enregistreur graphique de houle (E.G.H.) (fig. 19) :

Cet appareil se présente sous la forme d'un petit meuble monté sur table roulante. Il se tare comme l'enregistreur d'onde mais son em-

FIG. 18. — Enregistrement de l'abaissement du plan d'eau provoqué par le transit d'une maquette de navire dans un canal de faible section. — Echelle de l'enregistrement : 1/2.

Recording of water surface drop caused by passage of model boat in a small section canal. Recording scale : 1/2.

ploi est beaucoup plus souple. L'opérateur peut centrer son enregistrement en cours d'essai sans retoucher au capteur en agissant sur un bouton de centrage. Il dispose de trois sensibilités de rapport 1, 2, 5 permettant de changer le rapport d'enregistrement en cours d'essai, quand l'appareil est commuté, par exemple

d'un capteur au large à un capteur placé au fond d'une darse où l'agitation est faible. Un amplificateur continu correcteur permet d'atteindre des périodes de l'ordre de 0,3 seconde sans erreur dynamique importante.

Un filtre commutable appelé filtre « seiche » permet d'éliminer les variations de plan d'eau

FIG. 20 a et 20 b. — Enregistrement de clapotis le long d'un quai.
Sensibilité : 1/2 mm par carreau.

*Clapotis recording alongside a quay.
Sensitivity : 1/2 mm per square.*

FIG. 21. — Clapotis total.
Total clapotis.

FIG. 22. — Agitation le long d'un quai. Sensibilité : 1 mm par carreau.
Disturbance alongside a quay. Sensitivity : 1 mm per square.

FIG. 23. — Clapotis. — On remarquera le croisement d'harmonique.
Clapotis. The harmonic crossings are noticeable.

à la fréquence de la houle pour ne conserver que les lentes variations, par exemple une seiche excitée par la houle et d'amplitude assez faible pour être masqué par celle-ci.

Enfin, un filtre spécial permet d'éliminer, à l'inverse du filtre « seiche », les périodes longues pour ne garder que les variations du niveau correspondant aux phénomènes de la houle. Ce filtre est d'une grande importance

pratique dans le cas des mesures faites avec les chariots auto-moteurs; en effet, dans leur lent déplacement, ces chariots varient en enfoncement moyen par rapport au plan d'eau par suite de la flèche et du mauvais nivellement des rails supports. Cette variation peut entraîner un décadre de l'enregistrement et est, de toute manière, fort gênante pour le dépouillement des essais. Grâce au filtre de centrage,

l'enregistrement reste centré au milieu du papier de l'enregistreur et la comparaison des agitations aux différents points critiques devient très aisée.

Enfin, l'appareil possède une possibilité de « marquage d'espace » permettant de repérer l'enregistrement par rapport à des points fixes du modèle dans le cas de la mesure sur chariots auto-moteurs.

La figure 20 *a* représente un enregistrement de houle le long d'un quai, avec marquage d'espace, mais sans filtre de centrage. La figure 20 *b* représente un enregistrement analogue avec filtre de centrage. Les figures 21, 22, 23 montrent quelques types d'enregistrement de houles sur modèles.

3. *L'indicateur d'amplitude* (fig. 24):

Cet appareil est composé d'une petite mallette très facilement transportable et d'un capteur monté sur trépied.

Il indique sur un milliampermètre la valeur maximum de l'agitation aux points de mesure. Son principe de détection de niveau est le même que pour les deux appareils précédents, mais il possède en plus un dispositif de détection et d'addition des amplitudes de creux et de crête et un relai de remise à zéro. Pour faire une mesure, l'opérateur, après avoir placé son capteur au point de mesure, ramène l'aiguille du milliampermètre à zéro à l'aide d'un poussoir puis laisse l'aiguille se stabiliser à la valeur maximum de l'agitation qu'elle atteint au bout de 5 ou 6 périodes de houle.

Cette méthode a l'avantage de donner au technicien, au cours même de l'essai, des données quantitatives sur les agitations et de lui permettre de modifier immédiatement la disposition des ouvrages en contrôlant l'influence de ces modifications sur les agitations. Il permet donc de dégrossir les problèmes et de rejeter des solutions particulièrement défavorables, en laissant aux appareillages plus précis le soin de compléter avec précision ces données quantitatives dans les cas les plus critiques.

E.G.H., enregistreurs d'onde et indicateurs d'amplitudes sont depuis deux ans en service sur les mêmes modèles du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, partout où il est nécessaire de mesurer avec précision des niveaux rapidement variables. Leur fabrication fait à présent l'objet de petites séries.

CONCLUSION.

Les trois appareils décrits ci-dessus semblent permettre de résoudre, dans la plupart des cas, les problèmes posés par la mesure des niveaux rapidement variables en Laboratoire d'Hydraulique.

Ils présentent une précision suffisante pour l'étude physique des phénomènes dynamiques. D'autre part, l'E.G.H. en particulier possède une souplesse d'utilisation qui facilite grandement l'exploitation des modèles à houle.

J. BOUDAN,

LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE
(Neyrpic - Grenoble).

FIG. 24. — Indicateur d'amplitude et son capteur.
Amplitude indicator and detector.

LABORATORY PRACTICE

Instruments for the measurement of rapidly varying levels on hydraulic models (*)

Texte français, p. 526.

Measuring methods on hydraulic models are becoming more perfected every day and specialists are no longer content with knowledge of the mean values of the phenomena under consideration. The study and measurements of dynamic phenomena are of increasing importance. Among the rapidly varying values encountered in hydraulics, fluctuating levels are of considerable technical significance.

As a first analysis, these rapidly varying levels can be divided into three groups.

Periodic phenomena: waves, stationary waves, etc.
Phenomena that are, on the average, permanent, and yet fluctuate: hydraulic jump, etc.

Transitory phenomena: waves, tidal waves, etc...

This classification is of value to the measurement specialist, for the same methods do not apply to each of these groups.

We shall make a quick survey of the methods of measurement applied to rapidly varying levels and give a short description of some of the instruments that have been designed in this field. Finally, we shall present new equipment developed and now in use in the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

METHODS OF MEASUREMENT

We shall consider:

- On the one hand, the "synthetic" or "global" methods which are applicable to the phenomenon as a whole, at various points in space.
- On the other hand, those measurements which, in contradistinction, we shall call "analytical", which apply to the local study of the phenomenon in relation to time.

a) SYNTHETIC METHODS.

As a rule, these are not accurate methods, but they are sometimes the only ones applicable, particularly in the study of transitory phenomena on

three-dimensional models. The reason is that, in most cases, the phenomena cannot be repeated identically; one must therefore be able to measure the evolution of disturbances in all characteristic points, throughout the test.

Among the methods suitable for obtaining such measurements the following should be noted:

- Stereophotography;
- "Starry sky";
- The Neyrpic ondoscope.

The drawback of stereophotography is that it requires long and difficult interpretation. This method, commonly used for the measurement of sea-wave amplitude near the coast, has been applied in the measurement of translation waves in open channels (Experimental and the theoretical study, by M. Henry Favre, 1935).

The "starry sky" method, however, developed by Mr. BARILLON, Chairman of the "Technical Committee of the Société Hydrotechnique de France" has been applied with success, in particular at the Chatou Laboratory (Electricité de France).

The third process, using the Neyrpic ondoscope, is used in our laboratories, particularly for the study of waves in channels or in marine scale models. In practice, the level in the model is detected at 40 different points by capacity detectors (described hereafter). These forty signals are transmitted simultaneously to the screen of an oscillograph which is photographed with a cine-camera at the rate of 8 frames per second and a sort of profile of the model is thus obtained. Fig. 1 (*) shows the detectors installed in part of a marine model. Fig. 2 shows a propagation phase of a wave in a channel.

b) ANALYTICAL METHODS.

These methods are much more generally applied than the previous ones. They are often sufficiently accurate to meet the requirements of physical research on the evolution of levels. Local variation of the level in one point is observed in relation to time. If the phenomenon is periodic, the number

(*) Paper submitted by Mr. BOUDAN to the Technical Committee of the Société Hydrotechnique de France. — Session: 25th to 27th November, 1952.

(*) See French text.

of measuring points can be increased and the disturbance studied in all parts of the model. Simultaneous measurements at all characteristic points is then no longer necessary. These analytical methods apply to the particular and very important case of the study of disturbance in harbour models.

We shall now give a short description of some instruments suitable for this type of measurement.

INSTRUMENT FOR ANALYTICAL MEASUREMENT

The various methods of measurement give either the amplitude value or a recording of the local level variation in relation to time. Most of these methods can be classified as follows:

1. — *Manual method* :

By this method it is possible to record the maximum amplitude of the water surface variation at the measurement point. A direct or an inverted point is used. The point is often equipped with a cathodic eye indicator or a neon pilot light placed in the plate of a vacuum tube. This arrangement provides greater sensitivity.

Accuracy is limited by the need to take an instantaneous reading and by capillary phenomena. However, the relative accuracy is good in the case of a regular wave of fairly great amplitude. If the test is carried out by an experienced technician, the absolute probable error at the crest or in the trough is about $4/10$ of a millimetre. The amplitude will therefore be determined to an accuracy of more than one mm. For an amplitude of 10 cm the relative error will be less than one %. At this approximate error, the amplitude value of a regular wave given by this method is unquestionable. The measurement with an electric measuring point will therefore serve to check results obtained with other instruments. Fig. 3 shows a measuring point fitted with a neon light checking device.

2. — *Mechanical method* :

Chronologically, this was the first method used for the recording of waves on hydraulic models. A light float controls an axis-mounted lever of low inertia, and a stylus records, on a smoked plate (fig. 4) the polar co-ordinates of the float movements. This device has the advantages of simplicity and economy but its installation is generally somewhat difficult.

This method of measurement is the subject of an extensive study in a thesis that Mr. RANSFORD, of the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, submitted to the Faculty of Science of Grenoble (1950). With regular waves the error remains fairly small up to periods of about 0.8 sec. For smaller periods, the float generally emerges and shows an exaggerated amplitude. If the wave is irregular, the float soon becomes incapable of following the harmonics.

3. — *Optical method* :

Attempts have been made to record level variations by projecting into a sensitive plate the image of a luminous source reflected on the surface of the

water. This method is based on the same principle as that of the starry sky. In the case of the starry sky, it was of undoubted value owing to the possibility of obtaining an overall measurement of the disturbance at all points of the model. It is fairly difficult, however, to connect the movements of the luminous point to the amplitudes, and accuracy is often illusory owing to the state of the surface.

The float mechanical recorder can be perfected by replacing the recording stylus by a small mirror reflecting a ray of light on to a sensitive paper. This makes for less friction and reduced weight. The increased accuracy and sensitivity, however, do not make up for the difficulty of operation. An apparatus of this type has, however, been used for a time in the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. Figures 5 and 6 show the installation and the working of a series of these recorders.

4. — *Electro-mechanical method* :

In order to avoid being dependent on a purely mechanical device for the power required to make the recordings, the movements of the recording pen follow, by means of a servo-motor, that of an electric point detecting the surface of the water. Among the recording instruments of this type, that designed by Mr. VALEMBOIS, of the National Laboratory of Chatou, should be mentioned: the vibrating head limnigraph, at present constructed by the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique (fig. 7). This apparatus is very reliable and sufficiently flexible in use, and can follow regular waves having a period of about 1.5 sec. For technological reasons, and particularly on account of the inertia of the servo-motor, it is not possible to measure phenomena of shorter period without applying a correcting factor to the amplitude.

The vibrating head used alone, however, enables measurement of very rapid phenomena having amplitudes of less than 2 mm. This method has been the subject of a Paper by Mr. VALEMBOIS to the Technical Committee of the S.H.F., in May 1952.

5. — *Electric method* :

As the apparatus that we are submitting is based on detection of level variations by an electrical process we shall now discuss this process at greater length.

MEASUREMENT OF LEVEL BY ELECTRICAL PROCESSES

These methods have been developed during the last few years in most hydraulics laboratories. They require fairly complex equipment and they may be criticized for the influence of surface tension and of physical parameters of the water: temperature, salinity, turbidity, etc. Nevertheless, owing to their lack of inertia and their flexibility of operation, they are generally preferred to other methods of measurement.

Electric instruments for the measurement of levels are characterized in the first place by the type of detector which converts a level variation into an electric quantity: detectors may be of the discontinuous or of the continuous type.

Discontinuous detectors consist of a series of terminals equally spaced along a vertical line. Resistances are connected in series between these terminals. The resistances corresponding to the immersed terminals are shunted by the water and the total resistance varies in relation to the immersion of the detector. Although attractive in principle, this detector has many drawbacks. If the resistances are small, the water can no longer be considered as a perfect mass and the reading will vary with the resistivity of the water; moreover, the measurement will no longer be a linear reading. Conversely, if the resistances are large, the meniscus will play a considerable part; the spacing of the terminals does not enable accurate measurement of small amplitudes; finally, the detector is very bulky and can cause disturbances in the phenomenon to be measured.

Continuous detectors therefore seem preferable. In addition, their construction is usually fairly simple, their cost is low and a number of detectors can be placed at the points of measurement. We shall describe two types of continuous detectors which have been used in practice to a large extent; resistance detectors and capacity detectors.

1. — Resistance detectors :

This type of detector has been in use for several years at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. The first detectors consisted originally of 2 plates, then 2 metal rods, about 1 mm in diameter, a few millimetres apart.

Variations of electrolytic resistance of the liquid were measured between two electrodes in relation to the immersion of the detector. Later, detectors were made of a single rod serving as a measuring electrode (fig. 8), the electric circuit being closed by masses placed in the model. These detectors are very sturdy, and can be fed with 50 cycle power supply; the measuring equipment therefore included an isolating transformer to reduce the main tension to a voltage compatible with operation of the detectors; the secondary winding of this transformer fed a Wheatstone bridge in one of the branches of which was inserted the measuring detector. The feed of a cathodic oscillograph was placed in the measuring diagonal of the bridge. The length of the spot varied with immersion of the detector. Its variations were recorded, after adjustment, on a strip of sensitive paper which was unrolled continually, in front of the oscillograph screen, by a cine-camera. Fig. 9 shows the central recording point with two recording units; fig. 10 shows a recording of waves carried out by this method.

This equipment has numerous drawbacks, principally of a practical nature, i.e., recording on sensitive paper prevents the operator from following the recording; hence decentering of the image or defects in sensitivity, others are of a technical nature; the recording is not linear to immersion of the detector. But the most serious defects lie in the physics of the detector itself.

Impedance, the measured electrical quantity is not localised on the detector skin but in the surrounding liquid medium. The potential field, seen in plane, is, in the case of a two-rod detector,

similar to a doublet field, and, in the case of the rod detector, to the field of a source in a two-dimensional infinite medium. The impedance of the detector therefore depends on the geometrical conditions near the measuring point. Calibration will vary with the depth of water, the proximity of quays, the distance from the mass and even the camber of the free surface. The influence of the meniscus will to the contrary, remain small. On the other hand, measurements carried out with this detector have the defects of all measurements taken in an electrolytic medium. Even if resistivity variations of the medium remain negligible, in order to obtain satisfactory electric stability, it will be necessary to choose the metal of the electrodes first, then to work with a frequency which is sufficiently high to reduce polarisation effects and, finally, not to exceed a certain tension gradient near the electrode. These conditions complicate the equipment by requiring both supply from a low frequency generator and measurement with a high gain amplifier (bearing in mind the low tension supplied by the detector).

Most of these errors are eliminated by the use of the capacity detector.

2. — Capacity detectors :

The principle of these detectors is not particularly new; it is mentioned in the Lectures on Measurement given by Mr. VADOT, at the Grenoble School of Hydraulic Engineers. However, use of these detectors has not so far developed for technical reasons, i.e.: the difficulty in obtaining an insulating wire which is both sufficiently thin and sufficiently homogeneous. The present manufacture of high resistance enamelled wire for windings provides a perfectly satisfactory answer to this problem. Capacity detectors in use at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique are therefore constructed with high mechanical resistance enamelled wire, stretched on a metal frame which serves as a support; this design is shown in fig. 11. Fig. 12 shows the permanent installation of a capacity detector in a channel for the study of waves.

The measuring capacity is cylindrical; the inner electrode is the copper wire, the dielectric is the enamel, and the outer electrode is the water. If the diameter of the wire and the thickness of the dielectric are constant, the capacity and therefore the admittance of the point varies linearly with the immersion.

Experience shows that it is easy to find industrial wire with enamel of a constant thickness, and with good accuracy over the short lengths required by detectors. The principal advantage of these detectors is that they eliminate electrolytic resistance and polarisation effects which are always very difficult to avoid. A high level signal can therefore be transmitted to the detector, which simplifies the equipment and increases the safety of operation. It will even be possible to measure the signal, as given by the detector, without amplification, independently of the recording apparatus.

Since the measuring admittance is concentrated on the "skin" of the point, the water being a practically perfect mass in relation to the impedance of the detector, and, moreover, the resistance of the

mass being in phase quadrature, all so-called geometric errors are eliminated: bottom, walls, shape of the surface.

The meniscus error, however, is somewhat greater than with resistance points. This error is reduced by the fact that the water does not wet the enamel, but it remains very marked for large diameter points, the first to be used. In practice, it can be eliminated with wire of some tenths of a millimetre in diameter for large amplitude waves requiring wire of high resistance, and with wire of some hundredths of a millimetre for small waves in a model. The meniscus error thus becomes practically undiscernible and is less than some tenths of a millimetre.

The impedance of the point can be reduced by increasing the frequency of the signals, but then loss and leakage on the line occur: with resistance points these are negligible.

The practical solution is a compromise: the number of wires in the detector is increased in order to make the losses and accidental variations on the line negligible (contact by hand, accidental immersion), but a fairly high impedance is retained to eliminate influence of the mass.

Present detectors have an impedance of from 2 to 5,000 ohms, at a frequency of 15 kilocycles.

Therefore, after long research, we have given up resistance detectors and have produced a number of semi-industrial type instruments based on the use of the capacity detector.

Equipment based on the use of capacity detectors and constructed by the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

From an electrical point of view, a detector appears as a capacity which varies linearly with immersion. This capacity has a wide angle of loss which is due partly to the enamel's own loss, and partly to the resistance of the water in series. Owing to this angle of loss, it is not possible to apply the classical high frequency methods of capacity measurement by adjustment of an oscillatory circuit. In addition, for the convenience of model operation, i.e., in a wet medium, we have preferred to remain in the low frequency range and to choose 15,000 cycles per second as signal frequency. The measurement is reduced to that of an admittance varying linearly with the physical phenomenon to be detected.

It can be observed that if the tension at the terminals of the detector remains fixed, the current consumed by the detector will vary linearly with the admittance, i.e., with the phenomenon. However, the power available at the terminals of the detector is too low to consider applying it directly to operate a pen recorder.

We did, indeed, prefer the inked pen system to other methods of recording, for it makes operation very much easier. A permanent check of the recording is really a very important factor in the results of the tests. Moreover, French industry now produces rapid-response ink recorders designed to meet the requirements of radio broadcasting.

We shall therefore place an amplifier between the detector and the recorder. The technical

problem is to supply the amplifier with a tension that varies linearly in relation to admittance of the detector and of as high a level as possible in order to require only a small gain from the amplifier, as this will ensure good linear readings and reliability.

In a lecture on the halometer given by Mr. SAUVAGE-DE-SAINT-MARC to the S.H.F. in November 1950 (*), a linear admittance assembly has already been described. The admittance to be measured is connected in series with an impedance in phase quadrature with it. In the case of the capacity detector, this impedance will be a resistance. If this impedance has a modulus equal to 1/15th of the minimum modulus of the variable impedance, it is shown that the tension at the terminals of the fixed impedance varies linearly with the admittance of the detector. The element of error is less than 2.25 %. We have perfected this design by introducing a varying phase counter-reaction at one of the terminals of the detector, the other terminal being earthed. This counter-reaction stabilises the tension at the terminals of the detector and it is thus possible to obtain a tension of a very high level, varying linearly with the admittance of the detector. In practice, the measuring tension varies linearly from 0 to about 20 V, when the detector passes from emergence to maximum immersion.

We have designed three types of instrument based on this principle and meeting with various requirements.

- The first of these instruments, the wave recorder, is specially adapted to the study of waves in channels.
- The second, the wave graphic recorder (E.G.H.), can be used for the same purpose as the first, but it is much more flexible in use and lends itself to the semi-industrial operation of wave models.
- The third, the amplitude indicator, is very easy to handle but is less accurate than the first two. It is intended for preliminary studies on models. It is not a recorder but gives the amount of maximum disturbance at the points of measurement.

With all three instruments, the measuring base is always placed on the edge of the model. The detector can be moved from one part of the model to another; for instance, on the wave models of the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, these detectors are generally placed on small self-propelled trolleys running on rails and sweeping the characteristic areas, as represented on fig. 13. Fig. 14 shows the installation of the feed line for a trolley-carried detector. Often, several detectors are even used successively in the course of a single test, the difference in adjustment from one detector to another being most of the time less than one per cent. The distance between the detectors and the measuring base can vary from several metres to about one hundred metres.

(*) Mesure de salinité, par MM. SAUVAGE DE SAINT-MARC et BOUDAN, *la Houille Blanche*, n° A, 1951, p. 263.

In the practical realization of the equipment we have developed a new system of interchangeable units similar to that at present in use in electronic instruments. In fact, the instrument consists of small units, each of which constitutes an electronic unit: oscillator, power park, amplifier, signal unit to the recorder, for instance. These units are joined to the general frame by connectors and they can be fitted instantaneously. Thus a non-specialized technician can deal with a fault in the instrument; a technological detail of this kind is very important for the success and continuity of the tests. Fig. 15 and 16 show several aspects of this design.

We shall now give a brief description of the three instruments and their features.

1. — *The wave recorder* (fig. 17) :

The instrument consists of two cases fitted with carrying handles and a set of gauges. The first case contains the electronic equipment, the second contains the recorder.

After selecting the detector corresponding to the type of test, the operator adjusts the instrument by applying known static immersions to the detector. By means of an adjusting knob, he brings a whole number of centimetres or millimetres to correspond with each linear graduation of the recorder, and this greatly facilitates interpretation of the results.

The range of measurable amplitudes is included between 50 cm and 1/2 mm. Accuracy is often as high as 1 % for periods greater than 0.6 sec. If the phenomenon is of too short duration to be recorded graphically, an independent oscillograph is used: the latter has a manually controlled sweep with a duration varying between 18 sec. and 1/100th of a second, which enables the phenomenon to be photographed by time exposure.

Fig. 18 shows a recording of waves in a channel as obtained with this instrument.

2. — *Graphic wave recorder* (E.G.H.) (fig. 19) :

This apparatus takes the form of a small cabinet mounted on a table fitted with wheels. It is adjusted in the same way as the wave recorder but it is much more flexible in use. The operator can center his recording during a test, without touching the detector, by moving a centering knob. Three sensitivity ratios are available; 1, 2 and 5, thus enabling the recording ratio to be changed in the course of a test when, for instance, the instrument is switched from a detector in deep water to a detector placed at the bottom of a basin where there is little disturbance. It is possible, by means of a direct correcting amplifier, to reach periods of about 0.3 sec. without significant dynamic error.

By means of a commutable filter known as the "seiche" filter, it is possible to eliminate variations in the water surface having the same frequency as the wave and to retain only the slow variations, for instance a "seiche" brought on by the wave and of so small amplitude that it is concealed by the wave.

In addition, by means of a special filter, as opposed to the "seiche" filter, it is possible to eliminate long periods and to retain only those level variations that correspond to wave phenomena.

This filter is of great practical importance in the case of measurements taken with self-propelling trolleys, for in their slow movement these trolleys, owing to camber and bad alignment of the supporting rails, vary in mean immersion with relation to the water surface. This variation can cause decentering of the graph and in any case it is a disturbing factor in interpretation of the results. Due to the centering filter, the graph remains in the center of the paper on the recorder and comparison of disturbances at the various critical points becomes very easy.

Finally, this apparatus allows for "space markings", thus making it possible to locate the recording in relation to fixed points on the model, in the case of measurements with self-propelling trolleys.

Fig. 20 a shows the recording of a wave alongside a quay, with "space markings", but without the centering filter. Fig. 20 b shows a similar recording with a centering filter. Figs 21, 22 and 23 show several types of wave recordings on models.

3. — *The amplitude indicator* (fig. 24) :

This instrument consists of a small portable carrying case and a detector mounted on a tripod.

A millimeter gives the maximum disturbance at the points of measurement. The principle of level detection is the same as for the two previous instruments, but it is fitted, in addition, with a device to detect and add up the trough and crest amplitudes and a zero return relay. To effect a measurement, after having placed the detector at the point of measurement, the operator brings the pointer of the millimeter back to zero by means of a button, then allows the needle to settle at the point of maximum disturbance which is reached after 5 or 6 wave periods.

This method has the advantage of providing the operator, even during the test, with quantitative data on the disturbances, and of enabling him to modify immediately the installation lay-out whilst checking the influence of such modifications on the disturbances. It is thus possible to give approximate answers to problems and to reject particularly unfavourable solutions, whilst leaving it to more sensitive instruments to provide accurate quantitative figures, in the most critical cases.

E.G.H. instrument, wave recorders and amplitude indicators have been in use on the same models for two years at the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, at all points where it is necessary to measure accurately rapidly variable levels. They are at present constructed in small series.

CONCLUSION

The three instruments described above appear to enable the solution in most cases of problems arising in the measurement of rapidly variable levels in a Hydraulics Laboratory.

They are sufficiently accurate for the physical study of dynamical phenomena. Moreover, the E.G.H., in particular, is sufficiently flexible in use to facilitate considerably the operation of wave models.

J. BOUDAN.

Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique
(Neyrpic - Grenoble).