

LE COIN DU LABORATOIRE

Enregistreur de fond et de surface libre pour modèle réduit à fond mobile

English text, p. 296.

Nécessité d'un appareil précis et rapide pour l'étude de l'évolution du fond sur les grands modèles à fond mobile. Les conditions de la mesure. Principe et réalisation d'un « palpeur de fond » à détection électrique à distance.

Les études de transport de matériaux, d'érosion, de stabilité des fonds ou des berges, menées sur les modèles dits « à fond mobile » prennent une importance croissante.

La nature de ces essais impose le choix d'une échelle assez grande et les dimensions des modèles sont souvent considérables. De tels modèles posent au technicien des problèmes pratiques de mesure et d'enregistrement. Tant que le modèle est assez petit et que les points à sonder ne sont pas trop nombreux, on peut en effet se contenter d'une pointe de mesure ou d'un peigne pour relever l'évolution d'un fond en un point donné en cours d'essai ou pour déterminer, après essai, le profil d'un fond dans un plan vertical. Il devient pratiquement impossible d'employer un tel procédé lorsque les dimensions du modèle et la complexité de l'étude exigent le relevé de quelques centaines ou même quelques milliers de points à chaque essai.

C'est pourquoi nous avons étudié un appareil enregistreur de fond permettant soit le relevé rapide des profils après un essai soit le sondage

en un point fixe, en cours d'essai, dans le cas de l'étude de l'évolution continue du fond.

I. — Conditions de la mesure

1. — NATURE PHYSIQUE DU FOND.

Le fond mobile est constitué par un matériau léger en général. Dans le cas de la sciure de bois par exemple, la partie supérieure du fond est peu cohérente et le moindre effort peut produire un tassement important. Les palpeurs mécaniques enregistreurs présentent donc à cet égard de graves inconvénients.

2. — PREMIER TYPE D'ENREGISTREMENT : ENREGISTREMENT EN UN POINT FIXE.

Si l'enregistrement a lieu en un point fixe, la cote de l'appareil sera définie absolument et on

pourra enregistrer les variations du fond et de la surface libre. Dans ce cas, il y a en général écoulement au point de sondage et le sondeur ne devra pas modifier les conditions de l'écoulement. S'il y a suspension de matériaux, le sondeur devra différencier nuage en suspension et fond, pour autant que celui-ci soit défini.

3. — DEUXIÈME TYPE D'ENREGISTREMENT : RELEVÉ DE PROFIL.

Pour relever un profil, on déplacera l'appareil à peu près horizontalement dans le plan du profil. Le déplacement ne sera qu'à peu près horizontal, car le procédé de translation (pont roulant par exemple) entraînera des variations de la cote absolue de l'enregistreur, par suite des flèches de la poutre-support ou d'un mauvais nivellement. On repérera alors la cote du fond par rapport à la surface libre du plan d'eau calme. Dans ce cas, il n'y a évidemment pas d'écoulement au droit du plan de sondage.

4. — RÉPONSE DYNAMIQUE DE L'ENREGISTREUR.

Dans les deux cas, les phénomènes à enregistrer sont des phénomènes lents.

Dans le premier cas, c'est l'évolution d'un fond en un point fixe, affouillement ou remblaiement, en fonction du temps. Même sur modèle réduit, les variations relatives restent assez lentes. Par exemple, pour un affouillement de 20 cm obtenu au cours d'un essai, la vitesse relative de variation dépassera rarement un pour mille par seconde. On définit la vitesse relative de variation comme le rapport de la variation de cote du fond en une seconde à la variation totale en cours d'essai.

Dans le second cas, on enregistrera, dans un plan vertical, les variations de cote d'un fond stabilisé après essai. L'opérateur devra alors se fixer une vitesse limite de translation de manière que la vitesse relative de variation ne dépasse pas les possibilités de l'enregistreur.

5. — PRÉCISION REQUISE.

Dans la discussion des résultats d'essai, l'opérateur désirera connaître la précision des mesures. Il est difficile de définir une précision relative. L'appareil enregistre en effet des profondeurs d'eau, mais l'opérateur ne s'intéresse pas à l'erreur relative sur cette profondeur qui est souvent arbitraire (mesure du deuxième type où l'on procède parfois à un surremplissage du modèle avant les mesures pour pouvoir sonder jusqu'aux berges).

Par contre, on peut définir une précision absolue et une précision relative par rapport à la

variation maximum de fond rencontrée en cours d'essai. On ne désirera pas la même précision si les variations de fond sont de 50 cm ou de 1 cm.

II. — Principe de l'enregistreur de fond et de surface

L'enregistreur de fond et de surface est un appareil électromécanique. La grandeur mesurée (distance entre fond et surface libre) est parcourue par un sondeur mobile dont le mouvement est transmis mécaniquement au style d'enregistrement. La surface et le fond sont détectés électriquement et un système électronique de relai assure la commande automatique des mouvements du sondeur.

On doit donc distinguer :

- Le sondeur, dont le rôle est de détecter électriquement la surface et le fond;
- Le système électronique de commande;
- Le système mécanique d'enregistrement.

1. — LE SONDEUR.

Le sondeur est divisé en deux parties : le sondeur de surface et le sondeur de fond.

a) *Le sondeur de surface* est d'un type déjà classique dans les enregistreurs de niveau. C'est une simple pointe métallique effilée placée électriquement en série avec une résistance élevée.

Le point commun à la pointe et à la résistance

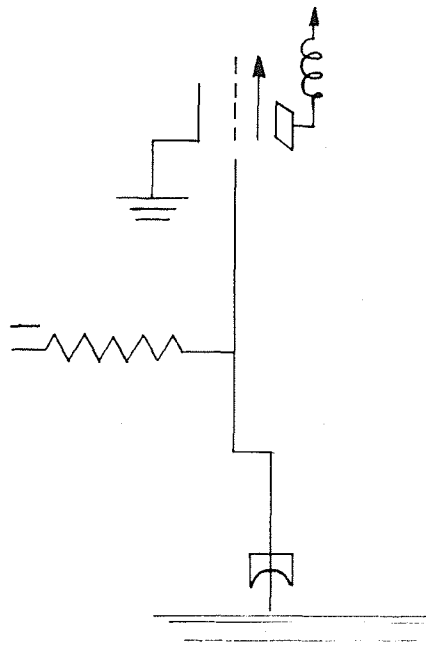


FIG. 1. — SCHÉMA ÉLECTRONIQUE DU RELAIS DE SURFACE.
Electronic diagram of surface relay.

est réuni à la grille d'un tube à vide, qui se trouve bloqué par une assez forte tension négative lorsque la pointe est hors de l'eau.

Lorsque la pointe touche l'eau à la descente (pour éviter l'effet de ménisque), la grille se

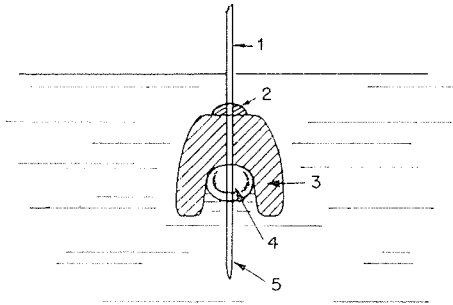


FIG. 2. — LE SONDEUR DE SURFACE.
Surface detector.

- 1. — Fil isolé. — *Insulated wire.*
- 2. — Etanchéité. — *Watertight seal.*
- 3. — Cloche. — *Air trap.*
- 4. — Bulle d'air. — *Air bubble.*
- 5. — Pointe. — *Point.*

trouve amenée au potentiel de masse (qui est aussi celui de la cathode) et le tube se débloque. Un relai rapide, appelé relai de surface, est placé dans le circuit-plaque du tube (fig. 1).

Pour éviter de shunter la pointe par une pellicule d'eau, après émergence, la fixation de la pointe est maintenue sèche grâce à une petite cloche renversée qui emprisonne une bulle d'air à la descente (fig. 2).

b) *Le sondeur de fond* est basé sur l'effet de distorsion d'un champ électrique sous l'influence du fond, dont la résistivité diffère de celle de l'eau du modèle. Cette distorsion se produit à l'approche du fond, si bien que le sondeur ne touche pas le fond et ne risque donc pas de transmettre une erreur par enfoncement, comme les palpeurs mécaniques.

Dans un premier type de sondeur, la tête de sondage était une simple électrode circulaire encastrée dans un petit bloc de plexiglass profilé. La résistance électrolytique de mesure était montée dans un pont dont la tension diagonale variait à l'approche du fond.

Avec ce montage, une variation de résistivité de l'eau du modèle entraînait un déséquilibre du pont qui perturbait la mesure.

Dans le sondeur adopté, la tête de sondage est munie de trois électrodes (fig. 3).

Une tension alternative de module constant est appliquée entre les électrodes A (électrode de détection) et C (électrode de compensation).

Le potentiel de B (électrode de déclenchement) ne dépend que du tracé du champ électrodynamique entre A, B et C et des conditions géomé-

triques voisines. Il ne dépend donc pas de la résistivité du milieu.

On doit noter que l'électrode B est reliée à la grille d'un tube (en série avec une résistance de protection) : elle est donc chargée par une impédance pratiquement infinie. L'influence de cette impédance est donc négligeable et le tracé du champ n'est pas modifié.

Lorsque la tête de sondage approche du fond, le champ entre A et B se trouve pincé et le potentiel alternatif de B se rapproche de celui de C et s'éloigne de A (dans le cas général où la résistivité du fond est plus élevée que celle de l'eau).

En toute rigueur, la variation de potentiel de B dépend du rapport des résistivités du fond et de l'eau, cette dernière variant un peu avec le temps et les sels contenus dans le fond. Plus ce rapport est grand (cas du sable, des résidus de matière plastique), plus le potentiel varie. Ceci peut entraîner une petite erreur dans la mesure, puisque, pour un même potentiel de déclenchement, la distance de la tête au fond peut être, par exemple, de 1 mm ou de 0,5 mm pour des fortes variations du rapport des résistivités. L'erreur absolue est toujours très faible.

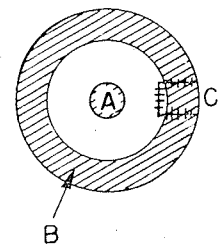
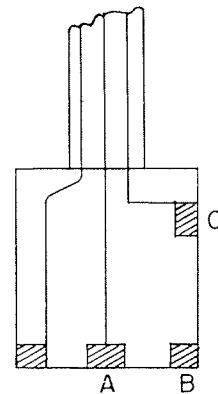


FIG. 3.
LE SONDEUR DE FOND.

Bed detector.

Remarquons que la mesure de champ se fait en milieu électrolytique, ce qui proscrit les tensions continues. Pour que la mesure soit stable,

on devra respecter certaines conditions de fréquence et de gradient de tension au voisinage des électrodes, et choisir judicieusement le métal des électrodes.

Nous avons vu que l'électrode B était reliée à la grille d'un tube. L'écran de ce tube est alimenté par une tension alternative en opposition de phase avec la tension C-A (fig. 4).

Le point C est relié au curseur d'un potentiomètre alimenté en tension alternative. Ce potentiomètre sert au réglage de la distance de déclenchement.

Si nous considérons l'alternance positive du secteur sur la grille-écran, nous voyons que nous nous réglerons de telle sorte que le tube soit bloqué lorsque le sondeur est dans l'eau loin du fond. A l'approche du fond, le potentiel de B diminue par rapport à la cathode et le tube se débloque.

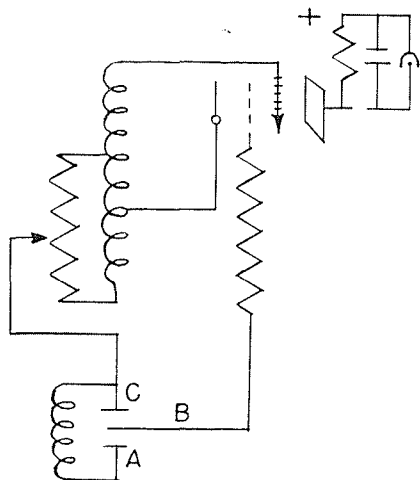


FIG. 4. — SCHÉMA ÉLECTRONIQUE DU RELAIS DE FOND.

Electronic diagram of bed relay.

Le débit du tube fait apparaître une tension aux bornes de la résistance de charge. Un voyant-néon placé en parallèle s'allume à l'approche du fond. Ce néon sert au réglage de distance.

Le système peut être réglé pour une *distance de déclenchement* variant environ entre 1,5 et 0,5 mm pour de la sciure. Avec du sable fin, ou des résidus plastiques, cette distance peut être portée à 3 ou 4 mm, ce qui est intéressant si on craint l'influence de la tête sur les affouillements, dans le cas d'un fort courant. Notons que la tête ne reste près du fond qu'un temps très court.

Si la tête sondeuse rencontre un nuage de matériau, la résistivité moyenne d'un tel nuage ne sera pas suffisante pour déclencher le système, du moins si le réglage est fait pour un déclenchement à petite distance du fond.

S'il y a charriage, et que le fond soit mal défini, la tête sondeuse pénétrera jusqu'à ce que la

condition de potentiel soit remplie pour l'électrode B. Dans la sciure, par exemple, elle pénétrera en pratique jusqu'à ce qu'elle rencontre des grains posés et imbriqués, ce qui correspond à la notion usuelle de fond dans ce cas. De toute façon, les mesures resteront comparables entre elles, la tête gardant une « notion de fond » pour un réglage donné.

2. — SYSTÈME ÉLECTRONIQUE DE COMMANDE.

Nous avons vu que la pointe de surface actionne par l'intermédiaire d'un tube le « relai de surface » qui se ferme lorsque la pointe touche la surface à la descente.

De même, le sondeur débloque un tube lorsqu'il arrive au voisinage du fond. Ce tube joue le rôle d'amplificateur de tension. Il commande à son tour le blocage d'un tube ayant un relai dans son circuit-plaque. Le « relai de fond » s'ouvre lorsque le sondeur arrive en descendant au voisinage du fond.

Le relai de fond joue un triple rôle :

- D'une part il coupe le courant de bobine du style d'enregistrement qui frappe le point de fond;
- D'autre part il inverse le courant du moteur de descente et de montée du sondeur à l'aide d'un relai inverseur;
- Enfin il condamne la cathode de son propre tube pour interdire sa refermeture lorsque la tête se sera assez éloignée du fond.

L'équipage mobile remonte jusqu'à ce que la pointe de surface sorte de l'eau. Le relai de surface est alors coupé. La coupure du relai de surface entraîne :

- L'inversion du sens de marche du moteur;
- Le déverrouillage du relai de fond qui pourra reprendre la commande;
- Le collage de l'électro du style prêt à frapper un point.

L'ouverture du relai de surface s'effectue avec un certain retard pour que la pointe de surface se dégage nettement du ménisque et puisse s'égoutter.

L'équipage descendant, la pointe frappe la surface libre, le relai de surface se referme.

Le moteur continue à descendre grâce au verrouillage assuré par le relai de fond que le relai de surface excite précédemment.

L'électro-aimant de frappe libère le style pendant un court instant, frappe le point de surface et se retrouve prêt à frapper le fond.

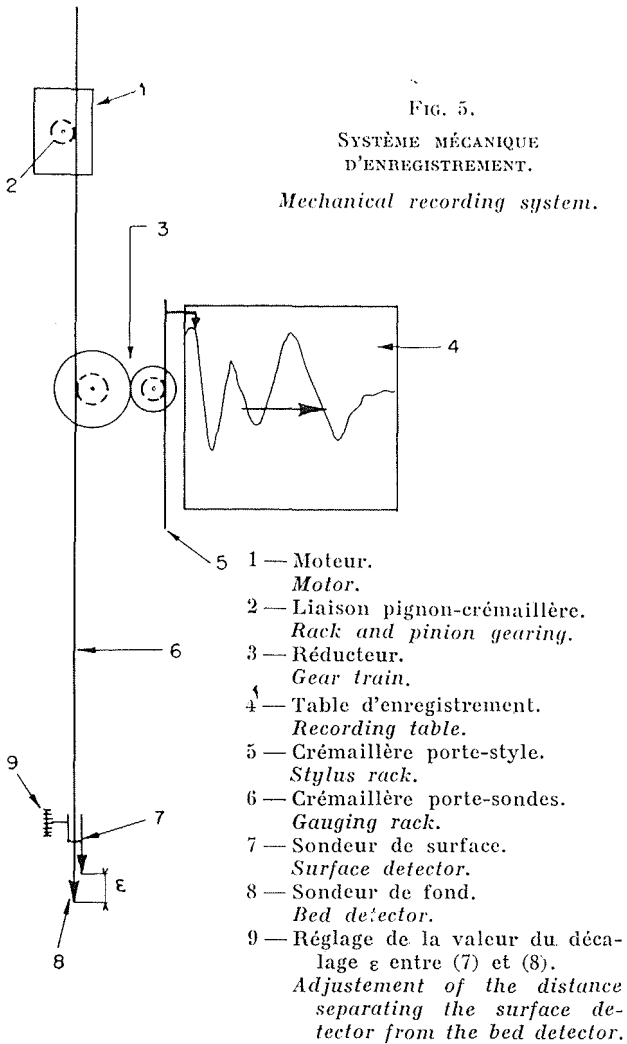
Le cycle recommence comme décrit ci-dessus.

Pour ne frapper que le fond, un petit interrupteur permet de mettre en permanence la cathode du tube « du relai de fond » à la masse.

Le sondeur commande la frappe du fond à sa distance de déclenchement et la remontée du moteur. Mais dès qu'il s'est éloigné du fond, il commande le collage du style et la descente du moteur. La période de récurrence et l'amplitude des oscillations dépendent de l'inertie et des retards des systèmes mécaniques (relais et moteurs).

3. — SYSTÈME MÉCANIQUE D'ENREGISTREMENT.

Dans les prototypes d'enregistreur de fond et de surface actuellement réalisés, les parties « sondes » et « électroniques » ont fait l'objet



d'une mise au point détaillée. La partie mécanique d'enregistrement étant actuellement en cours d'étude, nous n'en donnerons que quelques indications générales.

Le papier d'enregistrement est déroulé par une table de largeur utile 22 cm dont les vitesses de déroulement sont comprises entre 10 mm/h et 1 mm/s. La frappe se fait sur ruban encreur, le papier d'enregistrement étant placé verticalement. Le moteur actionne la tige-support du sondeur par une liaison pignon-crémaillère. Le style qui donne un enregistrement ponctuel est lié rigidement à une crémaillère coulissante liée elle-même mécaniquement à la pointe sondeuse (fig. 5).

On peut enregistrer de cette manière des variations de fond d'environ 20 cm, avec une profondeur d'eau maximum d'environ 80 cm.

La pointe de surface est en effet réglable en cote par rapport à la tête sondeuse, ce qui revient à décaler la surface d'une certaine quantité indiquée sur une règle graduée en face d'un index porté par la pointe de surface. Grâce à cet artifice, on peut enregistrer sur le même graphique le fond et la surface même avec une profondeur d'eau supérieure à la largeur utile de la table enregistreuse.

On peut connaître aussi la cote exacte du sondeur par rapport au style et au bâti d'enregistrement. Si le bâti est accroché à un support de cote connue, on peut donc faire un relevé absolu des niveaux et des fonds ramené au zéro du modèle.

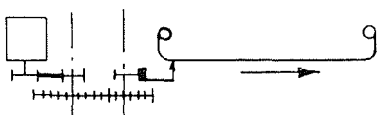
Le montage des rapports d'enregistrement 2 et 5 est actuellement à l'étude; ceci permettrait de sonder 40 cm et 1 m de variation de fond. Ces rapports se feraient par train d'engrenages intercalés entre crémaillère-sondeuse et crémaillère-enregistreuse.

Le moteur étant relié directement à la tige du sondeur, on conserve une vitesse de descente et de montée constante quel que soit le rapport de réduction. On diminue donc la vitesse relative de variation quand on augmente le rapport de réduction.

4. — PRÉCISION.

Comme en général dans tout appareil électromécanique, l'erreur d'enregistrement est une erreur absolue. La précision est d'ailleurs limitée par la nature de la mesure. Un fond est difficilement définissable à mieux d'un millimètre près.

Si l'on néglige les erreurs du système d'enregistrement (dilatation thermique, jeu de transmission) qui sont relativement très faibles, on peut distinguer deux types d'erreurs : d'une part



les erreurs statiques de détection des sondeurs; d'autre part les erreurs dynamiques dues au retard dans les commandes.

a) *Erreurs statiques.* — Le sondeur de surface ne déclenche pas en réalité au toucher de la surface. Il faut que la résistance du milieu s'abaisse à une certaine valeur petite devant la résistance série, donc que le palpeur s'enfonce suffisamment. On choisit la résistance série assez petite pour ne pas être gêné par les défauts d'isolement de la cloche, et assez grande pour que l'enfoncement de déclenchement soit de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre.

Le sondeur de fond est moins précis que le sondeur de surface. Nous avons signalé que la distance de déclenchement pouvait varier entre cinq dixièmes et 4 mm suivant les réglages. La stabilité du réglage dépend d'une part des variations du rapport des résistivités de l'eau et du matériau et, d'autre part, des variations du secteur qui agissent sur la polarisation du premier étage.

Pour un réglage à cinq dixièmes, la stabilité absolue en dixième de millimètre est évidemment supérieure à celle du réglage à 4 mm. L'instabilité du réglage peut être de l'ordre de 20 à 30 % du réglage, c'est-à-dire un peu inférieure au millimètre pour le réglage le plus défavorable.

b) *Erreurs dynamiques.* — Ces erreurs sont fonction de la vitesse de descente de la tige porte-sondeurs.

Le sondeur de surface ferme le relai de surface au toucher de l'eau (temps de fermeture 0,01 s). Le point de surface est frappé par l'intermédiaire du relai de commande (temps de fermeture 0,01 s) et de l'électro de frappe (temps d'ouverture 0,05 s). Le retard total, pour l'enregistrement de surface, est d'environ 0,07 s.

Le sondeur de fond débloque le tube d'entrée. Le retard est au plus égal à une alternance secteur (0,02 s). On doit ajouter pour le retard total de fond à l'enregistrement, le retard du relai de fond (à l'ouverture 0,02 s), et de l'électro de frappe (0,05 s), soit un temps total de 0,09 s.

Pour la commande d'inversion de sens de marche, s'ajoutent : le retard du premier tube (0,02 s), du relai de fond (0,02 s), de l'inverseur (0,02 s) et du moteur (0,6 s), soit un temps total de 0,12 s.

On voit que, pour une vitesse de descente de 2 cm/s, les écarts de frappe sont de 1,4 mm pour la surface et 1,8 mm pour le fond. La descente après enfoncement est de 2,4 mm, ce qui peut produire un léger creux sur le fond si la distance de déclenchement est inférieure à cette valeur.

Pour enregistrement en un point fixe, ce martèlement du fond qui risque de se cumuler

n'est pas admissible. Il faudra donc choisir de très petites vitesses de descente (1 cm/s ou moins). On voit que pour des variations de fond, en cours d'essai, de 20 cm, le temps séparant deux mesures successives de fond atteindra 40 secondes dans les plus grandes profondeurs.

Si l'essai exige une plus grande définition dans le tracé du fond, on n'enregistrera que le fond. A 1 cm/s, l'amplitude de relaxation sera d'environ 2,5 mm et la définition de deux points par seconde.

Pour le tracé du profil, le martèlement du fond est de peu d'importance puisqu'on ne frappe jamais deux fois à la même place.

Notons que le temps de retard n'entraîne pas systématiquement une erreur. L'erreur est due aux variations accidentelles du temps de retard, que l'on peut estimer à 20 % au maximum, ce qui donne une erreur absolue de 2,5 mm à 10 cm/s, et 0,25 mm à 1 cm/s.

La vitesse relative de variation impose certaines conditions à la vitesse de translation du chariot dans le plan vertical du profil.

Etant donné une pente du fond, dans le plan du sondage, il faut que la résultante de la vitesse de translation horizontale du chariot, et de la vitesse verticale du sondeur fasse avec l'horizontale un angle supérieur à l'angle maximum de pente du fond.

Par exemple, pour sonder un talus à 45°, si la vitesse verticale est de 4 cm/s, la vitesse de translation ne devra pas dépasser 3 cm/s.

Nous voyons que ces conditions imposent un temps minimum de sondage du profil pour une précision donnée. L'opérateur préférera parfois perdre en précision pour gagner en rapidité, ou au contraire s'imposera une précision assez grande, d'où une vitesse de sondage assez réduite, suivant la nature des essais.

III. — Présentation de l'appareil

Pour faciliter son transport et sa mise en place, l'appareil est réalisé en deux blocs :

D'une part le bloc mécanique, à platine verticale, portant la table d'enregistrement, le moteur des sondes, le système démultiplicateur et les têtes sondeuses. Cet ensemble peut être accroché comme une pointe de mesure à un support fixe, nivelé, pour la mesure en un point fixe. En ce cas, on connaît les cotes absolues de l'enregistrement par rapport au nivellement du modèle. Il peut être encore fixé sur le chariot d'un pont pour le relevé des profils. On s'affranchit

des flèches du pont en opérant le relevé par rapport à un plan d'eau donné.

Le bloc mécanique est muni d'un capot de protection, équipé d'une poignée pour le transport. Le porte-sondes et les crémaillères, qui dépassent de la platine, sont démontables et peuvent être accrochées sur un support. L'ensemble devient ainsi facilement maniable.

D'autre part, le bloc électronique se présente sous la forme d'une valise. Sur une petite platine sont fixés les boutons de mise en route et de réglage et les voyants.

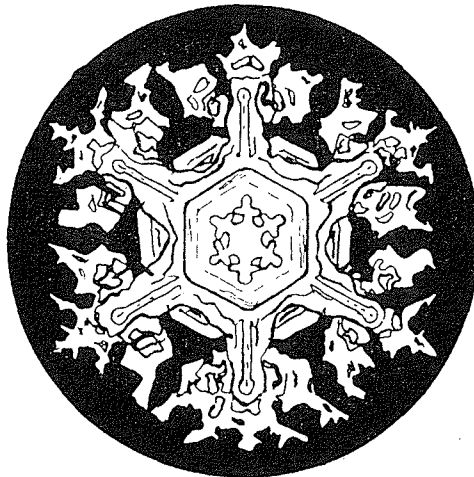
Un cordon souple de 2 m relie les blocs électronique et mécanique, et un second cordon amène le courant du secteur au bloc électronique.

Conclusion

L'enregistreur de fond et de surface est un appareil relativement simple dans son principe et sa réalisation. Comme en général tout appareil électromécanique, il possède une très bonne fidélité. Il est robuste, maniable et d'une grande souplesse d'emploi. La vitesse d'enregistrement est assez faible mais convient à la nature de la mesure.

L'enregistreur de fond et de surface est donc appelé à constituer un instrument de travail précieux sur les modèles à fond mobile.

LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE.



LABORATORY PRACTICE

Necessity of a rapid and accurate apparatus for the study of bed evolution on large moveable bed models. Measuring conditions. Theory and construction of an electric, distance detecting bed detector.

Bed and free surface recording on moveable bed scale models

French text, p. 289.

Illustrations are in French text, p. 289

Investigations carried out on so-called "moveable bed" models and dealing with such subjects as the transportation of solids, erosion, and bed and bank stability, are increasingly important.

This type of test necessitates the use of a rather large scale and the consequent size of the model gives rise to measuring and recording problems of a practical nature. As long as the model is fairly small and the points to be measured are not too numerous, a point gauge, or a set of point gauges, is sufficient to record the movement of the bed at a given point during tests, or to determine the profile of the bed in a vertical plane after the tests. However, it becomes practically impossible to use this method when the size of the model and the complexity of the investigations necessitate the measurement of several hundreds, or even some thousands of different points at each test.

It is for this reason that the Neyrpic Hydraulic Laboratory has designed a rapid, bed level recording apparatus which makes possible either the fixed recording of a given point of the bed during tests on uninterrupted bed movement, or the mobile recording of the bed profile after the tests.

I. — Measuring conditions

1. — PHYSICAL NATURE OF BED.

The moveable bed is generally formed of a light-weight material. For instance, when sawdust is used, the upper layers of the bed are not very coherent and the slightest contact may pack them down. Contact detectors therefore have many drawbacks from this point of view.

2. — FIRST TYPE OF RECORDING : FIXED RECORDING OF A GIVEN POINT.

When readings are taken at a given point, the absolute elevation of the apparatus is defined and the variations of the bed and the free surface can be recorded. With this type of operation, the water usually continues to flow on the model. The sounding-rod (which includes the two detectors and their supporting rod) should not change the flow conditions at the point to be recorded. In the event of

material in suspension, the bed detector should be able to differentiate between the suspended solids and the bed, insofar as this latter is definable.

3. — SECOND TYPE OF RECORDING : MOBILE RECORDING OF BED PROFILE.

In order to record a given profile of the bed, the sounding-rod is moved approximately horizontally in the same plane as the profile to be recorded. The movement is only approximately horizontal since the means of translation (e.g. overhead crane) causes variations in the absolute elevation of the apparatus which are due either to the flexion of the supporting girders or to bad levelling. The bed elevation is therefore located in relation to the free surface of the water when calm, and there is, of course, no water flowing over the profile to be recorded.

4. — DYNAMIC RESPONSE OF RECORDING APPARATUS.

In both cases, the phenomena to be recorded are slow ones.

The first case concerns the evolution of the bed, erosion or deposition, at a given point and as a function of time. Even on the scale model the relative variations remain slow. For instance, for an eroded depth of 20 cm. obtained during a test, the relative variation velocity rarely exceeds 1/1,000 per second. This relative variation velocity is defined as the ratio of the variation of the bed level in one second to the total variation during the test.

In the second case, the cumulative variations in level of the bed are recorded in a vertical plane after the test. The operator should therefore determine a maximum translation velocity so that the relative velocity of variation of the bed does not exceed the possibilities of the recording apparatus.

Required accuracy. — When the test results are analysed, it becomes necessary to know the accuracy of the measurements. It is difficult to define a relative accuracy. The apparatus records the various depths of water, but the point of interest is not the relative error of this depth, since its choice is often arbitrary (second type of recording, in which the level of the water in the model is sometimes raised before the tests, so that level readings may be taken close to the banks).

However, it is possible to define an absolute accuracy and a relative accuracy in relation to the maximum variation of the bed during the test. The same absolute accuracy is not required for a fifty centimetre bed variation as is for a one centimetre variation.

II. — The principle of the bed and surface recording apparatus

The bed and surface recording apparatus is electro-mechanical. A mobile sounding-rod moves through the distance to be measured (i.e., between the free surface of the water and the bed of the

model); its movement is transmitted mechanically to the recording stylus. The water surface and the bed are detected electrically and the movements of the sounding-rod are controlled automatically by an electronic relay.

The apparatus can thus be divided up into three distinct parts, namely :

- the sounding-rod, which detects the surface and the bed electrically,
- the electronic control relay,
- the mechanical recording system.

1. — THE SOUNDING-ROD.

The sounding-rod is formed of a supporting rod and two working parts, these being the surface detector and the bed detector.

a) *The surface detector* is of the classical type currently used for level recording. It is formed of a long metal point connected in series to a high resistance.

The connection of the detector and the resistance is itself connected to the grid of a radio tube which is blocked by a fairly high negative voltage when the detector is out of the water.

When the detector touches the water as it moves downwards (in order to avoid a meniscus effect), the grid potential becomes the same as that of the earth (which is also that of the cathode) and the tube is unblocked. A rapid surface relay is placed in the plate circuit of the tube (fig. 1).

In order to avoid shunting the detector by a film of water after it emerges, its upper end is kept dry by means of a small, bell-shaped, air trap which imprisons an air bubble as the detector is lowered (fig. 2).

b) *The bed detector* depends, for its action, on the distortion of an electric field under the influence of the bed, the resistance of which differs from that of the water on the model. This distortion occurs when the detector is near the bed; there is thus *no contact between the detector and the bed* and this latter is therefore not packed down, as is so often the case with ordinary contact detectors.

A type of detector, since discarded, incorporated a single, circular electrode set into a small rounded block of perspex; the water circuit resistance formed one arm of a Wheatstone's bridge and the diagonal voltage drop varied when detector neared the bed. However, with this arrangement, a variation in the resistivity of the water in the model upsets the working of the Wheatstone's bridge.

In the design finally adopted, the detector incorporates three electrodes (fig. 3). A constant strength A.C. voltage is applied between electrodes A (detecting electrode) and C (compensating electrode). The potential of the actuating electrode B depends only on the geometrical shape of the electrical field set up between A and C, and does not depend on the resistivity of the water. It should be noted that B is connected to the grid of a radio tube (through a protecting series resistance); the impedance of this circuit is extremely large. The leakage current through B is therefore negligible and the form of

the electrical field is not modified on this account.

When the detector nears the bed, the field between A and B is squeezed in, as it were, and the A.C. potential of B tends to approach that of C; the difference of potential between A and B is increased (this is so when, as is usual, the resistivity of the bed material is greater than that of the water). More precisely, the variation in the potential of B depends on the ratio of resistivities of the bed material and of water, and this varies with time and with the salt content of the bed. The greater this ratio, the greater is the variation of potential as the detector nears the bed. This can cause small errors of measurement as, for a given "actuating" potential, the distance of the detector from the bed may vary from 0.5 to 1.0 mm according to the resistivity ratio. The absolute magnitude of the error is, however, always small.

The fact that water is an electrolyte makes it essential to use alternating current; the frequency, the voltage gradient near the electrodes, and the metal of which the electrodes are made, must all be chosen correctly so as to ensure stability of operation.

As has been seen, the electrode B is connected to the grid of a radio tube; the screen of this tube is supplied by an alternating voltage 180° out of phase with the voltage C-A (fig. 4). C is connected to the slider of an A.C. potentiometer which regulates the distance above the bed at which detection occurs.

If the positive alternance of the A.C. supply to the screen-grid is considered, it will be understood that the apparatus should be adjusted so as to block the tube when the detector is in the water, but far from the bottom. As the bottom is approached, the potential of B is lowered in relation to the cathode potential and the tube is unblocked. The output of the tube creates a voltage drop across the terminal resistance and a neon lamp placed in parallel lights up; this lamp is used for regulating the detection height which may range from 0.5 mm to 1.5 mm for sawdust or up to 3 or 4 mm with fine sand or plastic waste material. The larger figures are advantageous if, as in the case of strong currents, bed erosion due to the presence of the detector is to be feared. If the detector passes through a cloud of suspended material, it will not react in general (the resistivity of such clouds is too low for this, at any rate if the detection height is kept small).

If there is much bed-load movement and if the bed is ill-defined, the detector will keep on descending until the potential of B reaches the "actuating" value with sawdust, this will occur when the detector reaches a fixed layer of grains; this condition corresponds to the ordinary concept of a bed. In any case, successive measurements always refer to the same sort of bed structure, and can therefore always be compared with one another.

2. — ELECTRONIC OPERATING MECHANISM.

It has been seen that the water level detector actuates (through a radio tube) a "surface relay" which shuts each time the detecting point touches the water surface while descending.

Similarly, the detector unblocks a radio tube when the bed is reached. This tube, which acts as a voltage amplifier, unblocks another tube having a second relay (the "bottom relay") in its plate circuit. The bottom relay, which is designed to open when the bottom is reached, has a triple purpose :

- (i) It cuts the current through the coil of the stylus which thus records the bottom level,
- (ii) It reverses the motor which raises and lowers the sounding-rod (by means of a reversing relay),
- (iii) It blocks the cathode of its own radio tube so as to prevent reshutting the relay once the detector has left the bottom.

The detecting unit rises until the surface point leaves the water, whereupon the surface relay closes. The closing of this relay results in :

- (i) A change in the direction of rotation of the motor,
- (ii) The unblocking of the bottom relay,
- (iii) The bringing into play of the electromagnet working the stylus; the latter is then ready to mark a point.

It should be added that the surface relay opens with a certain time lag, so as to clear the surface detector from the water and let it drain.

When the detector unit descends, the surface detector strikes the water and shuts the surface relay; the motor keeps on lowering the unit as the bottom relay is still in the open position. The stylus is freed for a moment as the point enters the water and marks the recording paper; it is subsequently ready to record the bottom level, and the whole cycle recommences as already described.

If it is desired to record bottom levels only a switch is provided for earthing the cathode of the "bottom relay" radio tube.

3. MECHANICAL RECORDING SYSTEM.

The detecting and electronic parts of the prototypes of this apparatus that have been constructed up to now, have already formed the object of special, detailed studies. Since the mechanical recording part is at present under investigation, is it not possible to give more than a brief general outline on its principle and operation.

The recording sheet unrolls vertically on a table of 22 cm useful width, at a speed of from 10 mm per hour to 1 mm per second. The readings taken are marked on the recording sheet with a typewriter ribbon and stylus. The sounding-rod is moved by a motor and a rack and pinion gearing system. The stylus, which marks the points at regular time intervals, is integral with a sliding rack which, in turn, is connected mechanically to the sounding-rod (fig. 5).

With this apparatus, bed variations of about 20 cm can be recorded with a maximum depth of water of some 80 cm.

The vertical position of the surface detector can be adjusted in relation to the bed detector. This

amounts to shifting the surface by a certain quantity which is given on a graduated rod and a pointer fixed to the surface detector. By means of this arrangement, both the bed and the surface readings can be recorded on the same sheet, even if the depth of water is greater than the useful width of the recording table.

It is also possible to obtain the exact elevations of the detectors in relation to the stylus and to the whole recording apparatus. If the apparatus is fixed to a support of known elevation, it becomes possible to make an absolute reading of the surface and the bed reduced to the reference level of the model.

The possibility of obtaining recording ratios two and five is at present under investigation. This will make it possible to take readings of bed variations of 40 cm and 1 m. Such ratios will be obtained by a gear train placed between the detector rack and the stylus rack.

Since the motor is connected directly to the sounding-rod, the raising and lowering velocity is maintained constant, no matter what the gear ratio may be. The relative velocity of variation is thus reduced when the gear ratio is increased.

4. — ACCURACY.

As is usually the case with any electro-mechanical apparatus, the error of the readings has a fixed value. The accuracy is, moreover, limited by the nature of the measurements made, and it is difficult, in any case, to define the bed to within less than one millimeter.

Apart from the errors of the recording system, such as thermal expansion, play in the transmission, etc., which are relatively very small, two sorts of error can be distinguished. These are the static errors of detection and the dynamic errors resulting from control time lags.

a) *Static errors.* — In point of fact, the surface detector does not close the electric circuit when it touches the water. The water resistance must drop to a certain value, which is low in relation to the series resistance, and the detector must therefore enter the water to a sufficient extent. The series resistance chosen must be low enough not to be affected by the defects in the insulation of the air trap, but high enough to close the circuit when the detector has entered the water by some tenths of a millimeter.

The bed detector is less accurate than the surface one. It has already been mentioned that the circuit closing distance can be adjusted to vary from 5/10 to 4 mm as required. The stability of the adjustment depends both on the variations of the water/solids resistivity ratio and on the variations of the mains which act on the polarization of the first stage.

With an adjustment of 5/10 mm the absolute stability in tenths of a millimeter is, of course, greater than that of the 4 mm adjustment. The instability can be approximately 20 % to 30 % of the adjustment, i.e., slightly less than one millimeter for the most unfavourable adjustment.

b) *Dynamic errors.* — These errors are a function of the speed with which the sounding-rod moves downwards.

The surface detector closes the surface relay when it touches the water (closing time : 0.01 sec.). The reading is marked on the recording sheet by the control relay (closing time : 0.01 sec.) and the recording electro (opening time : 0.05 sec.). The total surface recording time lag is thus approximately 0.07 sec.

The bed detector unblocks the entrance tube. The time lag is equal, at the very most, to one cycle of the mains current (0.02 sec.). To obtain the total time lag of the bed recordings, account should also be taken of the bed relay time lag (opening time : 0.02 sec.) and that of the recording electro (0.05 sec.), this giving a total time lag of 0.09 sec.

To obtain the time lag when changing the direction of motion, the following are added up : time lag of the first tube (0.02 sec.), of the bed relay (0.02 sec.), of the reverser (0.02 sec.), and of the motor (0.06 sec.) i.e., a total of 0.12 sec.

It is seen that with a lowering velocity of 2 cm/sec., the lag occurring between the closing of the circuit and the marking of the reading on the recording sheet is 1.4 mm for the surface and 1.8 mm for the bed. The sounding-rod continues to move down a further 2.4 mm after the circuit has been closed. This may cause a slight hollow in the bed if the circuit closing distance is less than this value.

In the event of the fixed recording of a given point, the continuous packing down of the bed at this point is inadmissible. Very small lowering speeds should therefore be chosen (1 cm/sec. maximum). It is seen that for 20 cm bed variations during tests, the period of time between successive bed measurements is 40 seconds in the deepest parts.

If a greater degree of accuracy is required for the bed variations, only the bed readings are taken. At the rate of 1 cm/sec., the relaxation amplitude is approximately 2.5 mm and two points per second are recorded.

The packing down of the bed is of little importance in the mobile recording of the bed profile, since the detector never touches the bed twice in the same place.

It is to be noted that the time lag does not cause real errors. The errors are due to occasional variations in the time lag, which can be estimated at a maximum of 20 %, this giving an absolute error of 2.5 mm at 10 cm/sec., and 0.25 mm at 1 cm/sec.

The velocity of horizontal translation of the sounding-rod in the vertical plane of the profile is submitted to certain conditions arising from the relative velocity of variation of the bed.

With a given bed slope in the plane of the readings to be taken, the resultant of the horizontal translation velocity and of the vertical operating velocity must form an angle with the horizontal that is greater than the maximum angle of the bed slope.

For instance, in order to take readings of a 45° slope with a vertical velocity of 4 cm/sec., the translation velocity should not exceed 3 cm/sec.

It is thus seen that these conditions necessitate a minimum profile recording time for a given accuracy.

In some cases, it may be preferable to carry out the tests slowly but with a high degree of accuracy, and, in others, to sacrifice accuracy to rapidity. This however, depends on the nature of the tests.

III. — The apparatus

The apparatus is made in two sections in order to facilitate transport and installation.

1. — *The Mechanical section* consists of a vertical plate, which supports the recording table, the sounding-rod motor, the speed reduction system, and the detectors. This section can be attached, in the same way as a standard type point gauge, to a rigid support set at a fixed elevation for the recording of a given point. In this case the absolute elevation of the bed can be determined, given that of the model. The section can also be fixed on an overhead crane for profile recordings. The effect of the flexion of the overhead crane is overcome by taking the readings in relation to a known water level.

The mechanical section has a protective cover and a handle to facilitate transport. The sounding-

rod and racks, which are longer than the plate, can be dismantled and attached to a support, and the section becomes easy to transport.

2. — *The electronic section* resembles a small suitcase. The control knobs and light controls are on a small plate. A two meter long, flexible electric cable connects the electronic and mechanical sections and another cable connects the electronic section to the mains.

Conclusion

The bed and surface recording apparatus is of relatively simple design and construction. As is usual with any electromechanical apparatus, the readings taken are very consistent. The apparatus is sturdy, easy to handle and very adaptable. The rapidity with which the readings are taken is not very great but is in keeping with this type of measurement, and the apparatus is a valuable instrument for work on mobile bed models.

*Neyrpic Hydraulic Laboratory
(Grenoble)*

